Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen
Komm. Direktor: Professor Dr. med. W. Höfler

Tagesperiodische Unterschiede der Schweißrate und der Wärmebilanz bei mittelschwerer Arbeit in feucht - heißem Klima

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
der Medizinischen Fakultät
(Theoretische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Dipl. Biol. Wolfgang Grodd
aus Detmold
1984

UB/TU
LEIDEN
Exhl.

Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen
Komm. Direktor: Professor Dr. med. W. Höfler

Tagesperiodische Unterschiede der Schweißrate und der Wärmebilanz bei mittelschwerer Arbeit in feucht - heißem Klima

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
der Medizinischen Fakultät
(Theoretische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Dipl. Biol. Wolfgang Grodd
aus Detmold
1984

Dekan: Prof. Dr. med. G. Fichtner

1. Berichterstatter: Prof. Dr. med. W. Höfler

2. Berichterstatter: Prof. Dr. med. E. Belz

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
I)	Einleitung	1
	a) Tagesperiodik	3
	b) Thermische Belastung durch Hitze	6
II)	Material und Methode	12
	a) Versuchsperson	12
	b) Klimakammer	12
	c) Meßprogramm und verwendete Geräte	13
	1. Tagesrhythmik	13
	2. Hitzebelastung	14
	d) Versuchsprogramm	15
	e) Auswertung	17
	1. Hitzebilanzberechnungen	17
	A. Stoffwechsel	17
	B. Arbeit	17
	C. Verdunstungswärmestrom	17
	D. Gewichtsverlust	18
	E. Strahlungswärmestrom	20
	F. Konvektionswärmestrom	20
	G. Wärmespeicherung	21
	2. Indirekte Versuchsparameter	21
	3. Statistische Auswertung	22
III)	Ergebnisse	
	a) Vorversuche unter Behaglichkeitsbedingungen	24

b) Tagesperiodik in feucht-heißem Klima (36/30 °C) 27

1. Temperaturverläufe 27

2. Wärmebilanzgrößen 31

A. Metabolismus und Gewichtsverlust 31

B. Strahlung, Konvektion und Speicherung 34

C. Evaporation 34

3. Tag-Nacht-Vergleich 38

c) Arbeitsversuche 40

1. Die Änderung der Tageswerte im Verlauf der Akklimatisation 40

2. Tag- und Nachtarbeit 43

A. Rektal- und Hauttemperatur, Gewichtsverlust und Pulsrate 43

B. Die einzelnen Hauttemperaturen 46

C. Stoffwechsel 50

D. Strahlung, Konvektion und Speicherung 54

E. Evaporation 56

IV) Diskussion

a) Die Temperaturverläufe in feucht-heißem Klima 61

b) Die Unterschiede zwischen 31/20 °C und 36/30 °C Trocken- bzw. Feuchttemperatur 62

c) Die Tagesperiodik von Wärmebilanz und Schweißabgabe 65

d) Tag- und Nachtarbeit in feucht-heißem Klima 67

e) Kerntemperatur, Schweißproduktion und Verdunstung 69

V) Zusammenfassung 72

VI) Literatur 73

I) Einleitung

Tagesperiodische Schwankungen der Körpertemperatur sind schon seit Anfang des letzten Jahrhunderts bekannt. So schreibt bereits *Authenrieth* (§ 538, 1801): "Im Schlafe findet sich die Wärme des Menschen meistens um $1^1/_2$ Grad geringer als bey Tage ... Abends ist die Wärme etwas größer als Morgens; Winters etwas mehr als im Sommer." Genauere Messungen über 24 h dazu legt *Gierse* (1842) anhand von Selbstversuchen vor. Zur Erklärung dieser Unterschiede stehen jedoch lange der Schlaf, die unterschiedliche Nahrungsaufnahme, der Stoffwechsel und die körperliche Aktivität im Vordergrund.

So macht *Kleitmann* (1923) die Beobachtung, daß es bei Perioden längerer Schlafunterdrückung zu einer Verringerung der Schwingungsweite der Rektaltemperatur kommt, und er erklärt deshalb, daß die Persistenz des Temperaturrhythmus vom Schlafe abhängig ist. *Day* (1941) folgert anhand von Schlaf-Schweiß-Studien bei Kindern, daß ein physiologischer Thermostat existiert, der durch den Schlaf niedriger eingestellt wird und so zur Abnahme der nächtlichen Temperaturen führt. *Geschickter et al.* (1966), die die nächtliche Temperaturregulation und EEG im Schlaf untersuchen, beobachten, daß es nach dem Einschlafen während bestimmter Phasen zu zeitlich umschriebenen Schweißausbrüchen kommt. Sie schließen daraus, daß durch die Kopplung von Schlaf und Schwitzen die Wärmeabgabe gefördert wird und daß der so entstehende Temperaturabfall zu einer besseren Restitution der Körperenergie führt. Dagegen stellt schon *Bärensprung* (§ 11, 1851) fest: "Die Temperatur ist zwar des Nachts am niedrigsten, aber sie sinkt auch, ohne dass man sich dem Schlafe überläßt, und umgekehrt hat ein Schlafen bei Tage, wie ich mich wiederholt überzeugt habe, ein bemerkbares Sinken und nachfolgendes Steigen nicht zur Folge." Er widerspricht auch schon der Behauptung einer Abhängigkeit des Temperaturanstiegs von der Nahrungsaufnahme. Dieser Zusammenhang wird auch von *Jürgensen* (p22, 1873) bezweifelt: "Die Hauptmenge der im Körper gebildeten Wärme rührt ja von den Oxydationen her ... Und diese Oxydationen werden durch

Nahrungszufuhr vermehrt. Aber damit ist noch keineswegs gesagt, dass auch ein zeitlicher Parallelismus zwischen Nahrungszufuhr und der Wärmebildung besteht."

Trotzdem herrscht in der Folgezeit die Auffassung vor, daß die Zufuhr von Nahrung und der Wechsel von körperlicher Aktivität den Tagesgang der Körpertemperatur begründen (*Liebermeister*, 1875; *Pembrey*, 1898). So postulieren *Sonden und Tigerstedt* (1895) die Abhängigkeit der Tagesrhythmik von den Schwankungen der Stoffwechselintensität. *Johansson* (1898) stellt bei seinen Messungen an nüchternen Versuchspersonen ebenfalls eine nächtliche Abnahme des Stoffwechsels und der CO_2-Abgabe fest, und er macht dafür und für die Temperaturänderungen eine verschieden starke Muskelaktivität verantwortlich. *Benedict* (1915) kommt wieder zu dem Schluß, daß die nächtliche Abnahme des basalen Stoffwechsel auf den Schlaf zurückzuführen ist. Während *Gessler* (p 395, 1925) ergänzend den Zusammenhang von Stoffwechsel- und Temperaturrhythmik wieder betont: "Die chemische Regulation ist bei Tag stärker als bei Nacht. Die täglichen Schwankungen der Körpertemperatur sind als Folge dieser Schwankungen der Erregbarkeit aufzufassen." Auf diesem historischen Hintergrund ist es nicht zu verwundern, daß noch *Hardy* (1961) die Ergebnisse so zusammenfaßt, daß der größte Teil der Temperaturschwankungen durch Nahrungsaufnahme und Aktivität verursacht wird.

Erst *Aschoff*, der sich schon länger mit der physikalischen Wärmeregulation und dem unterschiedlichen Vasokonstriktorentonus der Extremitäten bei Tage und bei Nacht beschäftigt hatte (1947 a,b,c,d), betont, daß beim Tagesgang der Körpertemperatur weniger die Wärmebildung als vielmehr die unterschiedliche Wärmeabgabe das Stellglied der tagesabhängigen Temperaturschwankungen darstellt (1955; 1958 a,b,c). Er führt diese Oberlegungen (1948) auf die Vorstellungen von *Bergmann* (1845) zurück, der seine Unterscheidung des Tierreichs in Homoitherme und Poikilotherme funktionell auch auf den Menschen übertrug und einen gleichwarmen Körperkern von einer wechselwarmen Körperschale unterschied. Dabei steht letztere im Dienste der physikalischen Temperaturregulation: "Die Haut des Menschen

bietet die Erscheinungen des Wechsels der Blutfülle in sehr hohem Grade dar, und sie ist noch dazu in so großer Ausdehnung von aller schützenden Haarkleidung frei. Dadurch ist sie also sehr geeignet, den Bedürfnissen der Gleicherhaltung der Temperatur im Innern des Körpers auszuhelfen." (p 310, 1845).

Diese andere Auffassung vom Ursprung der Temperaturrhythmik führt zu einer Erneuerung der Beobachtungen, die schon früher eine Unabhängigkeit der Temperatur- und Stoffwechselrhythmik von Bewegung, Schlaf und äußeren Bedingungen gefordert hatten (Übersicht bei *Völker*, 1927). 1962 können *Aschoff und Wever* nämlich nachweisen, daß die Temperaturperiodik beim Menschen unter Ausschluß aller Zeitgeber erhalten bleibt, d.h. endogene Ursachen hat. Das daraus entwickelte neue Konzept biologischer Rhythmik des Menschen sei daher in einigen die Fragestellung der Arbeit betreffenden Aspekten im Folgenden kurz dargestellt.

a) Tagesperiodik

Es ist einleuchtend, daß regelmäßige zeitliche Schwankungen physikalischer Eigenschaften der Umwelt sich in den physiologischen Zuständen der Lebewesen widerspiegeln, deren Lebensspanne die jeweilige Umweltperiode um ein Vielfaches übersteigt. Und so sind die durch Licht-Dunkel-Wechsel hervorgerufenen Änderungen im Tier- und Pflanzenreich an vielen Funktionen untersucht und gemessen worden (Zusf. bei *Bünning*, 1977). Allein für den Menschen sind bis heute über 100 tagesrhythmische Prozesse beschrieben worden (Zusf. bei *Menzel*, 1962 und *Wever*, 1979). Dabei hat sich gezeigt, daß viele dieser Funktionen sich auch dann periodisch ändern, wenn die Umweltbedingungen konstant gehalten werden. Die Rhythmen zeigen also Schwingungseigenschaften wie selbsterregte Oszillatoren, die mit konstanter Periode weiterschwingen und unter natürlichen Bedingungen durch äußere Zeitgeber mit der Umwelt synchronisiert werden. Die Periodendauer beträgt dabei - je nach Objekt - nur ungefähr 24 h, d.h. sie ist circadian, meist zwischen 23 und 27 h. Diese Eigenschaft ist für Pflanzen und Einzeller schon länger bekannt und wird

1962 auch für den Menschen nachgewiesen; sie gilt sogar für isolierte Organe, Gewebe und Gewebekulturen (*Bünning*, 1977).

Auffällig ist, daß die verschiedenen physiologischen Funktionen eines höheren Organismus wie Wachstum, Motorik, Temperatur, O_2-Aufnahme u. dgl. m. unter dem Einfluß äußerer Zeitgeber in ihren Schwingungen in fester Phasenbeziehung zueinanderstehen. Die Organismen haben also in der Stammesgeschichte nicht nur durch Kompartimentierung eine höhere räumliche, sondern mittels Rhythmen auch eine zeitliche Differenzierung hergestellt. Es ist deshalb immer wieder nach einem Steuerungszentrum, einer biologischen Zentraluhr gesucht worden; zumal sich im Lauf der Evolution die circadiane Organisation und ihre Präzision verfeinert haben. So ist beispielsweise die Aktivitätsperiode von Säugetieren ohne äußere Zeitgeber mit einer Genauigkeit von Minuten angebbar. Und die Mitnahmebereiche circadianer Rhythmen (range of entrainment) sind bei den Vögeln und Säugetieren stärker eingeschränkt, als dies bei niedrigen Wirbeltieren, Insekten und Pflanzen der Fall ist (*Aschoff*, 1978). Aber die Beobachtungen eines Splittings der Blattbewegungen und der Farbstoffsynthese bei Pflanzen unter Dauerlichtbedingungen (*Todt*, 1962) zeigen, daß die Pflanze offensichtlich nicht über ein einziges Steuerungszentrum verfügt. Ähnliches stellt *Hoffmann* (1970) auch für die lokomotorische Aktivität niederer Säugetiere (Tupaia glis) unter konstanten Bedingungen bei niedriger Beleuchtungsstärke fest. Er folgert, daß die Aktivität unter Dauerbedingungen durch zwei gekoppelte Oszillatoren (oder Gruppen von Oszillatoren) gesteuert wird und daß die Stärke und Richtung der Kopplung von der Beleuchtungsstärke abhängt. Nachdem zuvor schon *Aschoff* (1967 a) eine Änderung der Phasenbeziehung von Körpertemperatur und Aktivität beim Menschen unter Freilaufbedingungen von fast 90^0 gegenüber synchronisierten Versuchen beschrieben hatte, war damit die Zentraluhrhypothese nicht mehr aufrechtzuerhalten. Statt dessen wird ein Multi-Oszillator System des Menschen postuliert (*Wever*, 1975), bei dem ein circadianer Oszillator für die Körpertemperatur mit einer Periodendau-

er von 25,0 ± 0,56 h (*Wever*, 1979) und weitere individuenabhängige Oszillatoren für Aktivität, Stoffwechsel, Endokrinium etc. gefordert werden. Jeder von ihnen kontrolliert mit einem bestimmten Anteil die anderen Rhythmusvariablen, und umgekehrt wird jede Rhythmusvariable durch mehrere Oszillatoren gesteuert.

Unter "normalen", d.h. mit der Umwelt synchronisierten Bedingungen stellt sich damit das Bild der Temperaturperiodik als ein mit vielen anderen biologischen Rhythmen gekoppeltes System dar, in das auch viele "ultradiane" Rhythmen einbezogen sind. So scheinen Atmung und Kreislaufperioden bevorzugt ganzzahlige Frequenzbeziehungen zu den circadianen Änderungen einzunehmen, sodaß Gesundheit auch als "harmonische Frequenz- und Phasenordnung der Rhythmen" charakterisiert worden ist (*Hildebrandt*, 1976). Die Kopplung der Rhythmen erreicht dabei im Schlaf ein Maximum. Das wesentliche Zentrum der Vermittlung äußerer Reize und der Synchronisation endogener Rhythmen wird dabei im Hypothalamus vermutet. So finden *Henane et al.* (1977) eine merkbare Fluktuation der Körpertemperatur und der Schweißrate synchron mit den REM-Phasen der EEG's und meinen, daß die thermische Balance durch zwei Rhythmen gekennzeichnet ist: Einen basalen circadianen und einen der REM-Schlafphasen mit 80 - 90 min. Periodendauer, die beide durch integrative Funktionen des Nervensystems miteinander verknüpft werden.

Ändern plötzlich die äußeren Zeitgeber wie Licht, Arbeit, soziale Kontakte u.a. ihre Phase, wie es auch bei Schichtarbeit und Transmeridianflügen geschieht, so tritt eine Phasenverschiebung zwischen Aktivität und Temperaturzyklus auf. Man beobachtet z.B. bei Nachtarbeit eine sukzessive Phasenverschiebung, die erst nach 7 - 10 Tagen abgeschlossen ist. Dabei ist nie eine vollständige Inversion der Körpertemperatur feststellbar (*Knauth*, 1976). In dieser Übergangszeit (reentraiment) treten vermehrt vegetative Störungen des Schlafes, der Nahrungsaufnahme und der Verdauung auf, die auf eine Dissoziation der verschiedenen physiologischen Rhythmen zurückgeführt werden (*Rutenfranz*, 1978).

Die vorliegende Arbeit geht der Frage nach, ob tagesperiodische Änderungen der Körpertemperatur die Wärmebilanz des Menschen unter den besonderen Bedingungen von Hitzestress beeinflussen. Diese Frage ist insofern von Interesse, als im thermischen Behaglichkeitsbereich des Menschen die circadianen Temperaturschwankungen genauso wie die Reaktion auf extern oder intern vermehrt vorhandene Wärme ein Stellglied der Regulation gemeinsam benutzen: Den Vasomotorentonus. Während über die Physiologie der Temperaturregulation in kaltem wie in warmen Klima umfangreiche Untersuchungen existieren (Zusf. bei *Burton et al.*, 1955; *Hardy*, 1961; *Hardy et al.*, 1970; *Aschoff*, 1971; *Kerslake*, 1972; *Itoh et al.*, 1972; *Hensel*, 1973; *Monteith*, 1974; *Nadel*, 1977; *Wenzel et al.*, 1982), ist der temperaturregulatorische Aspekt der Tagesperiodik, d.h. die Abhängigkeit der Temperaturrhythmik von verscheidenen Klimabedingungen, wenig bearbeitet worden. Insbesondere die Frage, wie sich die Wärmebilanz in ihrem Tagesgang oberhalb der Behaglichkeitsgrenze verhält, ist bisher ungeklärt. Sicher ist bisher nur, daß die Temperaturperiodik des unbekleideten Menschen oberhalb der Behaglichkeitsgrenze von 31 ^{o}C prinzipiell persistiert (*Zoghaibi*, 1967; *Wyndham et al.*, 1968). Aber sie ist anders in der Wärmebilanz zu berücksichtigen, da bei thermischer Belastung durch Hitze der Weg der Wärmeabgabe durch den Schweiß benutzt wird. Während bei normalen Umgebungstemperaturen die Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung hinreichend ist, wird in bei Hitze eine Abgabe durch die Verdunstung von Schweiß nötig. Eine Interferenz von sudomotorischer und vasomotorischer Regulation sollte sich dabei im Tagesgang der Wärmebilanz bemerkbar machen. Die Grundzüge der thermischen Regulation in Hitze seien als der zweite wesentliche Aspekt des zu bearbeitenden Themas ausführlicher vorgestellt.

b) Thermische Belastung durch Hitze

Während also die Organismen sehr früh die periodischen Änderungen der Umwelt in ihre eigene zeitliche Struktur übernommen haben, ist der Erwerb der "thermodynamischen Freiheit" (*Burton and Edholm*, p 5, 1955) eine relativ späte Erfindung

der Vögel und Säugetiere. Dabei ist wahrscheinlich die Steigerung der Thermogenese der vorwärtstreibende Schritt gewesen. Es ist deshalb die Vermutung geäußert worden, daß die Evolution der Endothermen, wie eine neuere Klassifikation dieser Tiere lautet (*Cowles*, 1957), mit der neuen Stellung der Gliedmaßen im Obergangsfeld der Reptilien zu den Therapsiden, aktiven, vierfüßigen fleischfressenden Lauftieren in Perm und Trias, einhergegangen sei (*Heath*, 1968). Denn die rapide Zunahme der Muskelaktivität stellte eine überragende Quelle der Wärmebildung dar. Noch beim Menschen ist die Muskulatur während körperlicher Aktivität mit über 70% der Ort der höchsten Energieproduktion und selbst in Ruhe beträgt ihr Anteil noch ca. 30% (*Aschoff*, 1971). Diese Steigerung der Wärmebildung zog eine andere Entwicklung nach sich - die Regelung der Gehirn- und Kerntemperatur, die Homoiothermie, weil die erhöhte Aktivität vieler physiko-chemischer Prozesse sich nur bei einer konstant eingeregelten Temperatur effektiv koordinieren läßt.

Damit entstand ein neues Problem der Wärmebilanzierung: In Kälte mußten unnötige Wärmeverluste verhindert werden, in warmen Zonen wurden effektive Maßnahmen gegen Hitzestreß gebraucht; liegt doch die Letaltemperatur nur wenige Grade über der geregelten Körpertemperatur. Und so finden sich je nach Klima verschiedenartige Anpassungen, die der Erhaltung der thermischen Balance dienen: Fell- und Federkleid, subcutanes und braunes Fettgewebe, Pigmentierungen, jahreszeitliche Schwankungen des Stoffwechsels, Winterschlaf, Nachtaktivität und eine große Variation von Körpergröße und -form, wie sie die Allen- und Bergmannsche Regel beschreiben. Die wärmeableitenden Vorrichtungen versagen jedoch bei Umgebungstemperaturen oberhalb der Körpertemperatur; hier bleibt als Einziges die Kühlung mit Wasser. Viele Vögel und Säuger nutzen die hohe Verdunstungsenthalpie des Wassers aus, indem sie ihre äußere Oberfläche befeuchten oder Teile ihrer inneren Oberfläche mit Umgebungsluft ventilieren. Erst relativ spät evoluieren zwei Ordnungen der Säuger, die Ungulaten und die Primaten, wahrscheinlich unabhängig von-

einander, einen eigenen physiologischen Apparat zur Thermolyse: die Schweißdrüsen. Die Produktion von Schweiß wird dann soweit gesteigert, daß sie beim Menschen die aller anderen Spezies übertrifft. Aus diesem Grunde ist angenommen worden, daß der Mensch dem tropischen Klima entstammt (*Burton and Edholm*, 1955). Die populäre Meinung, daß sich infolge der gesteigerten Schweißsekretion ein Verlust der Behaarung eingestellt habe, um so die Verdunstungsmöglichkeiten zu erhöhen (*Morris*, 1968), wird allerdings bezweifelt. So nimmt *Newmann* (1970) an, daß sich die Entblößung der Haut schon bei den Vorfahren im tropischen Regenwald vollzog und daß sich mit dem Obergang in die Savanne erst die in trockenem und heißem Klima so erfolgreiche evaporative Wärmeabgabe verstärkt entwickelt habe.

Ein Mensch besitzt ca. 2,5 Millionen Schweißdrüsen (*Kuno*, 1956), die über das gesamte behaarte und unbehaarte Integument verteilt sind. Sie zeigen aber eine besondere Häufung an Handinnenflächen, Fußsohlen und Stirn. Die langen unverzweigten Drüsenschläuche sind im proximalen Teil von Myoepithelzellen umgeben, die von cholinergen sympathischen Fasern innerviert werden und durch Kontraktion den Schweiß austreiben können. Das Epithel der Ausführungsgänge ist dabei in der Lage, einen Teil der ausgeschiedenen Ionen (z.B. Na^+) rückzuresorbieren. Versorgt werden die Drüsen durch ein dichtes Gespinst von Blutkapillaren, die aus besonderen Zweigen der Hautarterien hervorgehen. Neben ihrem Überträgerstoff Acetylcholin reagieren die Drüsen in geringem Umfang auch auf Katecholamine mit erhöhter Sekretion, die auf eine β-Rezeptorenstimulation der Myoepithelzellen zurückgeführt wird (*Allen and Roddie*, 1971); ein Steuerungsweg, der bei den Ungulaten die Regel ist (*Whittow*, 1973).

Die hohe Schweißproduktion führt zu einem Verlust körpereigenen Wassers, den der Mensch in viel geringerem Maße als die meisten Tiere tolerieren kann. Ein Mensch mit 2-5% Gewichtsverlust an Wasser fühlt sich durstig, bei 10% ist er hilflos und bei 15-20% tritt der Tod ein (*Folk*, 1966). Da die einmalige Wasseraufnahme durch Trinken ebenfalls

stärker eingeschränkt ist, kommt es beim Menschen bei anhaltender Schweißabgabe zu einem "freiwilligen Defizit" (*Belding*, 1967). Dieses wurde bei unseren Vorfahren möglicherweise erst am Abend und in der Nacht nach Abklingen der Hitzeexposition bei körperlicher Ruhe wieder aufgehoben (*Newmann*, 1970). Bevor jedoch eine merkliche Hypovolämie entsteht, wird alles freie Wasser aus den anderen Kompartimenten des Extrazellulärraumes (wie Darm, seröse Körperhöhlen und Insterstitium) abgezogen. Bemerkenswert ist dabei, daß eine dauernde Hitzebelastung durch Flüssigkeitsverlust zwar zu einer Gegenregulation des Kreislaufes und der Wasserbilanz führt: Die Schlagfrequenz steigt und die ausgeschiedene Harnmenge nimmt ab, aber es tritt keine bemerkbare Vasokonstriktion der Peripherie auf. Adiuretin und die Pressorezeptorenreflexe können sich gegen die thermoregulatorische Dilatation der peripheren Hautgefäße nicht durchsetzen, sodaß es zu einer hypertonen Dehydratation mit Kreislaufkollaps kommen kann.

Mit der Ausbreitung des Menschen in die Subtropen und gemäßigten Breiten verliert dieser einen Teil seiner Hitzetoleranz. Der physiologische Umstellungsprozeß zur Wiederherstellung ist die Akklimatisation: Ein Anpassungsprozeß, der durch dauernde Hitzeexposition von 2-3 Wochen erreicht werden kann. Dabei scheint kein prinzipieller Unterschied zwischen natürlicher und künstlicher Akklimatisation zu bestehen, sofern letztere eine Hitzebelastung von mehreren Stunden täglich vorsieht (*Höfler*, 1968 b). Die wichtigsten physiologischen Änderungen sind:

1. Eine Steigerung der Schweißrate um bis 100-200% (*Laaser*, 1968) durch Zunahme der ekkrinen Sekretionsleistung und erhöhte Kontraktionsfrequenz der Myoepithelzellen (*Whittow*, 1973). Mit einer Zunahme der peripheren Durchblutung wird die Schwelle der Schweißabgabe gesenkt und ihre Anstiegscharakteristik steiler (*Roberts et al.*, 1977). Infolgedessen sinken durch bessere Kühlung Haut- und Kerntemperatur. Im Schweiß als einem Ultrafiltrat des Plasmas nimmt durch verstärkte Rückresorption der NaCl-Gehalt ab.

2. Es kommt infolge der verstärkten Kreislaufarbeit zu einer kardiovaskulären Anpassung. Nach anfänglich geringer Steigerung des Zeitvolumens durch erhöhte Frequenz bei abnehmendem Schlagvolumen ökonomisiert sich später die Herzarbeit durch größeres Schlagvolumen und niedrigere Pulsrate mit erhöhtem Minutenvolumen (*Wyndham et al.*, 1976).
3. Es ist eine Zunahme des Plasmavolumens von bis zu 25% innerhalb von zwei Wochen zu beobachten, die mit einer Erhöhung der absoluten Menge der zirkulierenden Proteine, insbesondere der β-Glubuline einhergeht (*Senay et al.*, 1976). Die auftretende Hämodilution scheint dabei auf einer besseren Drainage des Interstitiums zu beruhen, da die Aldosteron- und die Plasma-Renin-Aktivität im Verlauf der Akklimatisation unverändert bleiben (*Davis et al.*, 1981). Das erhöhte Blutvolumen erlaubt bei Schweißabgabe in Hitze eine stärkere Hämokonzentration als es unangepaßt der Fall ist (*Harrison et al.*, 1981). Bei der Anpassung der Körperflüssigkeiten wie bei der der Herzarbeit ist zu erwähnen, daß beide Anpassungen sowohl durch passive Hitze wie durch externe Arbeit in ähnlicher Weise auslösbar sind; die Belastungen durch Hitze wie körperliche Arbeit scheinen in gewissen Grenzen austauschbar zu sein (*Convertino et al.*, 1980).
4. Es tritt eine räumliche Umverteilung der Schweißproduktion auf. Die Schweißabgabe verlagert sich zunehmend vom Körperstamm zu den Extremitäten, an denen aufgrund des höheren Oberfläche/Volumen-Quotienten bessere Verdunstungsbedingungen herrschen (*Höfler*, 1968 a).

Für die Analyse der tagesperiodischen Änderungen der Wärmebilanz in heißem Klima ist somit vor allem der Tagesgang der Schweißproduktion zu untersuchen. Und es ist für die Bilanzierung zwischen Schweißrate und evaporativer Wärmeabgabe zu unterscheiden, da ein Teil Schweiß unverdunstet von der Körperoberfläche abtropfen kann (*Höfler*, 1968 b). Obwohl aufgrund der hier ausführlich dargestellten Natur der Temperaturperiodik des Menschen und der Thermolyse durch Schweißabgabe bei Hitzestress eine Beeinflußung der beiden auch topographisch-

anatomisch eng zusammengehörenden Regelsystem der Haut naheliegend erscheint, ist bisher kein wesentlicher Tag-Nacht-Unterschied in der Schweißproduktion gefunden worden. So findet *Westin* (1976) bei einem Kollektiv junger gut akklimatisierter Männer bei Hitzestress in feucht-heißem Klima Tag-Nacht-Unterschiede von weniger als 10%.

Um diese Frage erneut anzugehen, erschien es sinnvoll, eine Umgebungstemperatur im Bereich der Hauttemperatur auszuwählen, sodaß die Verdunstung zur Hauptquelle der Wärmeabgabe werden muß. Ferner sollte zur Erreichung einer großen Schweißrate die Wärmelast durch externe Arbeit erhöht werden. Es wurde deshalb eine weitere zusätzliche Arbeit von 4 h festgelegt, um Vergleiche mit anderen Arbeitsversuchen und Hitzebelastungen (*McArdle*, 1947) zu ermöglichen. Und schließlich wurde durch eine hohe Luftfeuchtigkeit auch die Wärmeabgabe durch Verdunstung erschwert. Vor den eigentlichen Hitzebelastungsversuchen wurde der Tagesgang der Körpertemperatur bei neutralen und erhöhten Umgebungstemperaturen ermittelt, um die Zeiten der Hitzebelastung in jene Phasen zu legen, in denen die stärkste gerichtete Änderung der Wärmeabgabe durch unterschiedlichen Vasomotorentonus auftrat.

II) Material und Methode

a) Versuchsperson

Als Versuchsperson (VP) diente ein 30-jähriger gesunder, sportlich trainierter, hellhäutiger Europäer mit einer Körpergröße (l) von 174 cm, einem Körpergewicht von (m_b) von 66,6 kg und einer Körperoberfläche (A_D) von 1,8 m^2. Er war während der Versuche mit einer Badehose bekleidet, ihm standen zur Unterhaltung und um bei den Liegeversuchen ein Einschlafen zu vermeiden, leichte Lektüre und ein Kofferradio zur Verfügung.

b) Klimakammer

Alle Versuche wurden in einer Klimakammer der Firma Meissner & Wurst, Stuttgart durchgeführt. Die Kammer lag im Keller des Instituts und war dort vom übrigen Institutsbetrieb weitgehend isoliert. Sie war weiß gekachelt, hatte eine Breite von 2,3 m, eine Länge von 3,6 m und eine Höhe von 2 m. Sämtliche Wände waren zum Schutz gegen Störungen des Klimas mit einer Isolierplattenschicht versehen, an die sich eine 12 cm dicke Ziegelschicht anschloß. Die Seitenwände der Kammer waren mit Grasmatten und einem Teppich behängt, deren Oberflächentemperatur höchstens 0,2 °C unter der Lufttemperatur lag. An der einen Seitenwand befand sich ein kleines Fenster, durch das die VP vom Vorraum aus beobachtet und kontrolliert werden konnte.

Die Kammer wurde durch einen mit variablem Anteil von Frischluft versehenen Luftstrom befeuchtet und temperiert, der 10 cm über dem Boden an der Schmalseite der Klimakammer einströmte, zur gegenüberliegenden Wand zog, dort hochstieg und durch eine Öffnung am oberen Rand der Ausgangswand wieder abströmte. An Boden, Hinterwand und Decke herrschte infolge der Luftumwälzung eine laminare Strömung von 0,5 m/s. Die Liege für die Rhythmikmessungen befand sich in einer Zone, in der eine geringere Luftbewegung herrschte, die mit 0,25 m/s angenommen wurde.

Die Trocken- und die Feuchttemperatur (t_a und t_{wb}) der Kammer wurden mittels eines Thermostaten mit einer Genauigkeit von 0,2 °C eingestellt. Eine Steigerung der Luftfeuchte wurde durch Versprühen vorgewärmten Wassers, eine Lufttrocknung durch eine Kühlmaschine herbeigeführt. Bei den Schwitzversuchen mußte allerdings manchmal in den Versuchspausen die abgetropfte Wassermenge unterhalb der VP aufgewischt werden, um einen stärkeren Anstieg der Luftfeuchte zu vermeiden. Aus diesem Grunde schwankten die gemessenen Temperaturen an einigen Versuchstagen im Bereich von $\pm$ 0,5 °C (t_a) und bis $\pm$ 1,0 °C (t_{wb}).

Als Klimakontrolle diente ein trockenes und ein feuchtes, ventiliertes Widerstandsthermometer, die beide an einen ausserhalb der Kammer befindlichen Zweifarbenschreiber angeschlossen waren, der t_a und t_{wb} kontinuierlich registrierte.

c) Meßprogramm und verwendete Geräte

1. Tagesrhythmik

Bei der Ermittlung der Tagesgänge der verschiedenen Körpertemperaturen lag die VP für jeweils 24 h auf einer bequemen Liege mit Kopfstütze. Die Liege war mit einer 3 mm dicken Kunststoffschnur bespannt, die einen Wärmestau an den aufliegenden Körperflächen verhinderte. Um diese Fläche nicht einer erhöhten Luftbewegung durch die Umwälzanlage auszusetzen, war 10 cm unterhalb der Bespannung eine Abdeckfolie aus Plastik angebracht.

Die Hauttemperaturen wurden im Abstand von 20 min. an folgenden Stellen gemessen: 1. Stirn (t_{st}), 2. linke Brust (t_{br}), 3. Epigastrium (t_{ep}), 4. linker Oberarm (t_{oa}), 5. linker Unterarm (t_{ua}), 6. linker Handrücken (t_{ha}), 7. linker Daumenrücken (t_{da}), 8. linker Oberschenkel (t_{os}), 9. linker Unterschenkel (t_{us}), 10. linker Fußrücken (t_{fu}) und linke Großzehe (t_{ze}). Dabei wurden die ersten sieben Stellen mit einem Thermomeßfühler nach Aufforderung durch den Protokollanten von der VP in immer dergleichen Reihenfolge an den zuvor gekennzeichneten Hautarealen

gemessen. Die vier am linken Bein befindlichen Stellen wurden mit Thermoelementen gemessen, die durch leicht sitzende Gummibänder befestigt waren. Als Kerntemperatur wurde die Rektaltemperatur (t_{re}) mittels eines 15 cm tief eingeführten und fixierten Thermoelementes alle 20 min. gemessen. Erfahrungen aus früheren Versuchen haben gezeigt, daß die an sich vorzuziehende Messung der Trommelfelltemperatur bei längeren Versuchen zu intolerablen Reizen führt. Alle Thermoelemente, der Thermomeßfühler einschließlich eines 12-buchsigen Verteilers und eines Ablesegalvanometers stammten von der Firma Ellab, Kopenhagen (Genauigkeit: 0,1 °C).

Die Herzfrequenz wurde über einen am Ohrläppchen fixierten photoelektrischen Pulszähler nach E.A. Müller der Firma Himmelmann, Dortmund registriert und über 20 min. gemittelt. Die Atemfrequenz wurde stündlich durch Beobachtung der Epigastriumsbewegungen durch den Protokollanten ermittelt. Das Körpergewicht (m_b) wurde mit einer Toledo-Waage zu Beginn, um 18, 24, 6 Uhr und am Ende des Versuchs auf $\pm$ 10 g genau bestimmt. Weiter wurde zur Bilanzermittlung die zugeführten Nahrungsmengen (Nüsse, Obst, Gurken, Brot und körperwarmer Tee) und die Urinausscheidung gewogen und notiert. Der Ruhestoffwechsel wurde durch indirekte Kaloriemetrie mit einer Respirationsuhr des MPI Dortmund ermittelt und die Gasanalyse in einem Hartmann & Braun Grundumsatzgerät um 15, 22, 2 und 11 Uhr durchgeführt. Die VP war gehalten, nicht einzuschlafen und wurde durch das Sichtfensterzum Vorraum vom Protokollanten entsprechend überwacht. Zur Verständigung diente eine Wechselsprechanlage.

2. Hitzebelastung

Die Arbeit wurde auf einem Fahrradergometer geleistet, das durch eine magnetische Bremse am Hinterrad auf eine Leistung von 8 mkp/s = 78,5 Watt = 67,5 kcal/h bei 60 Umdrehungen pro min. (rpm) eingestellt war. Die Hauttemperaturen wurden alle 10 min. an folgenden Stellen gemessen: 1. Stirn (t_{st}), 2. linke Brust (t_{br}), 3. linker Unterarm (t_{ua}), 4. linker Oberschenkel (t_{os}) und linker Unterschenkel (t_{us}).

Auf eine Messung der weiter distal gelegenen Temperaturen mußte aus technischen Gründen verzichtet werden. Die ersten drei Körperstellen wurden wiederum mittels eines Meßfühlers, die beiden letzten mit fixierten Thermoelementen ermittelt. Die Rektaltemperatur und die Pulsfrequenz wurden in den gleichen Zeitabständen in der zuvor beschriebenen Weise gemessen. Vor Versuchsbeginn und nach jeder Ruhe- bzw. Arbeitsstunde wurde das Körpergewicht gemessen und notiert. Die Pausen zwischen den einzelenen Arbeitsstunden betrugen maximal 10 min. In dieser Zeit wurde der ermittelte Gewichtsverlust durch die Zufuhr einer entsprechenden Menge körperwarmen Tees ersetzt.

d) Versuchsprogramm

Vor den eigentlichen Tagesrhythmikversuchen wurde ein Vorversuch mit 31 °C Trocken- und 20 °C Feuchttemperatur durchgeführt. Er sollte der Erprobung der Versuchseinteilung und einer groben Orientierung über die Tagesgänge der Haut- und Kerntemperatur im thermischen Behaglichkeitsbereich dienen, anhand derer die Tag- und Nachtarbeitszeiten festgelegt werden konnten. Bei diesen Vorversuchen wechselten 24 h Messung mit 12 h Ruhe ab. Die Versuche mußten jedoch am 4. Meßtag aufgrund der Erschöpfung der VP abgebrochen werden. Aus diesem Grunde wurden nur zwei gleiche Meßperioden (V_1 und V_3) ausgewertet.

Dann begannen die Tagesrhythmikversuche bei t_a = 36 °C und t_{wb} = 30 °C mit einem Abstand von 24 h zwischen den Meßperioden. Darauf folgten die eigentlichen Hitzebelastungsversuche , die mit einer zweiwöchigen Akklimatisationsphase begannen, in der nach einer Einübungszeit von 3 Tagen (A_1 - A_3) die Endbelastung von vier mal 1 h Ergometerarbeit erreicht wurde. Zur Herstellung des thermischen Gleichgewichts vor und nach der Arbeit wurde jeweils eine Ruheperiode von 1 h in der Kammer eingehalten, in der auch alle Parameter registriert wurden. An diese Akklimatisation schloß sich eine Woche Tag- und eine

Bezeichnung	Datum	Wochentag	Versuchsdauer in h			Uhrzeit		Klima (°C)
			Ruhe	Arbeit	Ruhe	Beginn	Ende	t_a°/t_{wb}
1. Vorversuche								
V_1	11./12.9.	Mo/Di	24	--	--	8^{30}	8^{30}	31/20
V_2	12./13.9.	Di/Mi	24	--	--	20^{25}	20^{40}	" "
V_3	14./15.9.	Do/Fr	24	--	--	9^{00}	9^{00}	" "
V_4	15./16.9.	Sa/So	24	--	--	20^{20}	10^{00}	" "
2. Tagesrhythmik								
R_1	18./19.9.	Mo/Di	24	--	--	12^{35}	12^{39}	36/30
R_2	20./21.9.	Mi/Do	24	--	--	12^{28}	12^{30}	" "
R_3	22./23.9.	Fr/Sa	24	--	--	12^{40}	12^{46}	" "
3. Akklimatisation								
A_1	25.9.	Mo	1	2	1	10^{25}	12^{42}	36/30
A_2	26.9.	Di	1	3	1	10^{30}	13^{45}	" "
A_3	27.9.	Mi	0	3	1	9^{40}	13^{00}	" "
A_4	28.9.	Do	1	4	1	9^{22}	13^{43}	" "
A_5	29.9.	Fr	1	4	1	10^{08}	14^{30}	" "
A_6	30.9.	Sa	1	4	1	9^{33}	14^{00}	" "
A_7	2.10.	Mo	1	4	1	10^{15}	14^{35}	36/30
A_8	3.10	Di	1	4	1	9^{30}	13^{48}	" "
A_9	4.10.	Mi	1	4	1	9^{23}	13^{58}	" "
A_{10}	5.10.	Do	1	4	1	9^{32}	13^{53}	" "
A_{11}	6.10.	Fr	1	4	1	9^{50}	14^{10}	" "
A_{12}	7.10.	Sa	1	4	1	9^{54}	14^{13}	" "
4. Tagarbeit								
T_1	9.10.	Mo	1	4	1	9^{30}	13^{45}	36/30
T_2	10.10.	Di	1	4	1	9^{28}	13^{45}	" "
T_3	11.10.	Mi	1	4	1	9^{30}	13^{45}	" "
T_4	12.10.	Do	1	4	1	9^{42}	13^{56}	" "
T_5	13.10.	Fr	1	4	1	9^{45}	14^{00}	" "
T_6	14.10.	Sa	1	4	1	9^{50}	14^{02}	" "
5. Nachtarbeit								
N_1	16./17.10.	Mo/Di	1	4	1	22^{04}	2^{13}	36/30
N_2	17./18.10.	Di/Mi	1	4	1	22^{03}	2^{16}	" "
N_3	18./19.10.	Mi/Do	1	4	1	22^{07}	2^{19}	" "
N_4	19./20.10.	Do/Fr	1	4	1	22^{14}	2^{28}	" "
N_5	20./21.10.	Fr/Sa	1	4	1	22^{17}	2^{31}	" "
N_6	21./22.10.	Sa/So	1	4	1	22^{03}	2^{15}	" "

Tabelle 1: Übersicht über das Versuchsprogramm mit Bezeichnung, Datum, Wochentag, Versuchsdauer, Uhrzeit und Klima der einzelnen Versuchstage.

Woche Nachtversuche an. Nähere Einzelheiten sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

e) Auswertung:

1. Hitzebilanzberechnungen

Die allgemeine Hitzebilanzgleichung unter Vernachlässigung der Wärmeverluste durch Konduktion lautet:

$$M - W = E + R + C + S \qquad (W/m^2) \qquad (1)$$

Diese Formel sowie die folgenden Symbole, Indizes, Einheiten und Konstanten weitgehend nach *Gagge et al.* (1969). Die Bilanzeinheiten in Watt pro m^2; M = Stoffwechsel, W = Arbeit, E = Verdunstung, R = Strahlung, C = Konvektion und S = Speicherung.

A. Der Stoffwechsel M wurde durch Bestimmung des Ventilationsvolumens $\dot{V}_{ex}$ sowie des Sauerstoffverbrauchs $\dot{V}_{O_2}$ und der Kohlendioxydabgabe $\dot{V}_{CO_2}$ in Litern pro h (STPD) nach

$$M = (4{,}39\ \dot{V}_{O_2} + 1{,}34\ \dot{V}_{CO_2})/A_D \qquad (2)$$

ermittelt (*Geigy*, Wiss. Tabellen, 8. Auflage 1977, umgerechnet in Watt), A_D= Körperoberfläche in m^2.

B. Die auf dem Fahrradergometer geleistete Arbeit W war fest vorgegeben; sie betrug 78,5 Watt bei 1,8 m^2 = 43,6 W/m^2 = 37,5 $kcal/h \cdot m^2$. Der Wirkungsgrad solcher Arbeit $\eta = W/M$ wird unter optimalen Bedingungen mit 0,2 angegeben (*Mitchell*, 1977).

C. Für den Verdunstungswärmestrom E gilt:

$$E = E_{ex} + E_s \qquad (3)$$

Hierbei ist E_{ex} der Verdunstungswärmeverlust über die Atemwege und E_s der Verlust über die Haut durch Diffusion und Schwitzen.

Der Verdunstungswärmestrom des Respirationstraktes E_{ex} wurde nach *Mitchell* (1977) berechnet:

$$E_{ex} = 0{,}0023 \cdot M \cdot (44 - P_a) + 0{,}61 \cdot (35 - t_a)/A_D \qquad (4)$$

Hierbei ist P_a der Wasserdampfdruck der umgebenden Luft

in mm Hg.

Für den Verdunstungswärmestrom über die Haut E_s gilt:

$$E_s = h_e \cdot (P_s - P_a) \cdot A_w / A_D \qquad (5)$$

Hier ist P_s der Wasserdampfdruck der feuchten Haut in mm Hg, A_w der Anteil der befeuchteten Hautoberfläche in m^2 und h_e der Wärmestromkoeffizient der Verdunstung in $W/(m^2 \cdot mm\ Hg)$. Für $A_w/A_D = 1$ ist die ganze Körperoberfläche befeuchtet und es wird E_s zu $E_{s\,max}$, der maximalen Verdunstungskapazität. Für eine solche vollständig feuchte Oberfläche gilt aufgrund der modifizierten Lewis-Relation, daß bei normalem Luftdruck von 760 mm Hg der Verdunstungskoeffizient h_e gleich dem 2,2-fachen Konvektionswärmestromkoeffizienten h_c ist. Näheres bei *Nishi et al.*(1970).

D. Wenn bei den Experimenten der Gewichtsverlust $\dot{m}_b$ innerhalb einer Zeitperiode gemessen wird, läßt sich E bei Annahme vollständig benetzter Oberfläche auch als:

$$E = \dot{m}_b \cdot \lambda / A_D \qquad (6)$$

errechnen. Hierbei ist $\dot{m}_b$ der Gewichtsverlust in kg/h und λ die Verdunstungsenthalpie des Schweißes, die gleich der des Wassers gesetzt werden kann. Sie beträgt für 35 °C 577 kcal/kg = 2416 kWs/kg (*Hodgman et al.*, 1960). Genauere Bestimmungen der Verdunstungswärme haben allerdings gezeigt, daß für nicht vollständig befeuchtete Oberflächen die Verdunstungsenthalpie diesen Wert in Abhängigkeit von A_w übersteigt (*Kerlake*, 1972). *Snellen et al.* (1970) geben den Mittelwert von 43,3 W·min/g = 2600 kWs/kg bei t_a von 32,5 - 42,5 und t_{wb} von 15 - 30 °C an. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch aufgrund der unsicheren Bestimmung von A_w der erstgenannte Wert des Wassers für die Berechnungen gewählt.

Weiter kann bei dem Gewichtsverlust $\dot{m}_b$ ein trockener $\dot{m}_d$ und ein feuchter Anteil $\dot{m}_w$ durch die Atmung ($\dot{m}_{ex} = \dot{m}_d + \dot{m}_w$) und ein dritter Anteil $\dot{m}_s$ durch Diffusion und Schwitzen unterschieden werden:

$$\dot{m}_b = \dot{m}_{ex} + \dot{m}_s = \dot{m}_d + \dot{m}_w + \dot{m}_s \qquad (7)$$

Der trockene Gewichtsverlust der Atmung $\dot{m}_d$ ist durch die unterschiedlichen Molgewichte von O_2 und CO_2 bedingt und berechnet sich als:

$$\dot{m}_d = \dot{V}_{O_2} \cdot (RQ \cdot \psi_{CO_2} - \psi_{O_2}) \qquad (8)$$

Dabei ist RQ der Respiratorische Quotient; ψ_{CO_2} und ψ_{O_2} sind die spezifischen Dichten von Kohlendioxyd (1,96 g/l, STPD) und Sauerstoff (1,43 g/l, STPD). Für RQ = 1 wird $\dot{m}_d$ gleich 0,53 g/l$\cdot\dot{V}_{O_2}$ (*Thauer et al.*, 1954; *Mitchell et al.*, 1972).

Für den Gewichtsverlust durch Wasserabgabe an die exspirierte Luft $\dot{m}_w$ in g/min geben *Mitchell et al.* (1972) mit $\dot{V}_{O_2}$ in l/min folgende Formel an:

$$\dot{m}_w = 0{,}019 \cdot \dot{V}_{O_2} \cdot (44 - P_a) \qquad (9)$$

$\dot{m}_s$ kann aus der Differenz $\dot{m}_b - \dot{m}_{ex}$ und E_s dann nach (6) berechnet werden. Und es gilt:

$$E_s/E_{s\,max} = E - E_{ex}/E_{s\,max} = w \qquad (10)$$

Hierbei ist $w = A_w/A_D$, der Anteil der befeuchteten Haut an der Gesamtoberfläche. Bei total befeuchteter Haut ist w = 1. Für trockene Haut wird w mit 0,06 angegeben (*Nishi et al.*, 1970). Diese 6% der Oberfläche sind der Anteil, der den unsensiblen Wärmeverlust durch Verdunstung über die Haut mittels Diffusion E_{diff} repräsentiert und der direkt proportional der Wasserdampfdruckdifferenz von Hautoberfläche zu umgebender Luft ($P_s - P_a$) ist (*Thauer et al.*, 1953; *Brebner et al.*, 1956; *Heerd et al.*, 1962). Die Verdunstungsbilanz kann also wie folgt geschrieben werden:

$$E = E_{ex} + E_{diff} + E_{rs} = E_{ex} + (0{,}06 + 0{,}94\ w_{rs}) \cdot E_{s\,max} \qquad (11)$$

Wobei E_{rs} bzw. w_{rs} den durch reguliertes Schwitzen sich ergebenden Anteil der Verdunstung bzw. der Oberfläche bedeuten (*Hardy*, 1971). Wenn ferner $E_s = E - E_{ex}$ den Wert von $E_{s\,max}$ übersteigt, so ist $E_{s\,max}$ der richtige Wert für den Hitzeverlust durch Evaporation, da die restliche Menge an Schweiß unverdunstet abtropft.

E. Der Strahlungswärmestrom R ist für Wellen im infraroten Bereich (Wellenlänge > 3 µm) bei einem unbekleideten Mann mit gleicher Temperatur von Wänden und umgebender Luft zu berechnen als:

$$R = \sigma \cdot \varepsilon \, (\bar{T}_s^4 - T_a^4) \cdot A_r/A_D \qquad (12)$$

Hierbei ist σ die Stefan Boltzmann Konstante von $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $W/(m^2 \cdot {}^oK^4)$, $\bar{T}_s$ die mittlere Hauttemperatur in ^oK und ε die Emissionszahl der menschlichen Haut für langwellige Strahlung. ε beträgt durchschnittlich 0,95 (*Gärtner et al.*, 1964 a,b). T_a, die mittlere Umgebungstemperatur des Raumes in ^oK, wurde in den Versuchen gleich der Strahlungstemperatur T_r in ^oK angenommen.

Die Formel (12) läßt sich für $\bar{T}_s - T_a \leq 20\ ^oC$ ohne große Ungenauigkeiten vereinfachen zu (*Burton et al.*, 1955):

$$R = h_r \cdot (\bar{t}_s - t_a) \cdot A_r/A_D \qquad (13)$$

Hierbei ist $h_r = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^3$ mit $T = (\bar{T}_s - T_a)/2$. Das Verhältnis der strahlenden Körperoberfläche A_r zur Gesamtoberfläche ist abhängig von der Körperhaltung. *Cena* (1973) gibt 0,78 für Liegen, 0,81 für Radfahren und 0,95 für aufrechte Haltung mit ausgebreiteten Armen an. Bei einer mittleren Hauttemperatur $\bar{t}_s$ von 35 ^oC und einer Kammertemperatur t_a von 36 ^oC errechnet sich h_r mit 6,32 $W/(m^2 \cdot {}^oC)$.

F. Der Konvektionswärmestrom C läßt sich für unbekleidete Personen mit $A_c = A_D$ ermitteln als:

$$C = h_c \cdot (\bar{t}_s - t_a) \qquad (14)$$

Hierbei kann der Konvektionswärmestromkoeffizient h_c nach der Formel von *Nishi et al.* (1970) berechnet werden als:

$$h_c = \alpha \cdot v^{\beta} \qquad (15)$$

v ist die Geschwindigkeit der Luftströmung in m/s und α und β sind Faktoren, die vom Aktivitätsniveau und von der Körperregion der VP abhängen. Die Autoren geben für ihr Versuchskollektiv (n = 7, $\bar{l}$ = 172 cm, $\bar{m}_b$ = 66,2 kg und $\bar{A}_D$ = 1,79 m^2) α mit 8,6 bei einer maximalen Streuung von 4.99 bis 11,8 und β mit 0,531 bei einer Streuung von 0,385 bis 0,565 zwischen Unterarmen und Körperstamm an, sodaß:

$$h_c = 8{,}6 \cdot v^{0{,}531} \qquad (16)$$

wird. Diese Formel stimmt relativ gut mit der schon von *Kerslake* (1972) vorgeschlagenen Formel $h_c = 8{,}3 \cdot v^{0{,}5}$ überein und wurde daher bei allen Berechnungen des Koeffizienten zugrunde gelegt. Für die Ergometerarbeit mit v = 0,5 m/s wird $h_c = 5{,}95$ W/(m^2·°C) und für die Liegeversuche mit v = 0,25 m/s wird $h_c = 4{,}12$ W/(m^2·°C).

Wie bereits erwähnt, berechnet sich h_e (pro mm Hg) unter Normalbedingungen als $2{,}2 \cdot h_c$. Daher ist h_e für die Arbeitsversuche 13,09 W/(m^2·mm Hg),und für die Liegeversuche ergibt sich 9,06 W/(m^2·mm Hg).

Ferner lassen sich Konvektions- und Strahlungswärmestrom zusammenfassen als:

$$R + C = h_{rc} \cdot (\bar{t}_s - t_a) \qquad (17)$$

Hierbei ist $h_{rc} = h_r \cdot A_r/A_D + h_c$. Für die Arbeitsversuche ist h_{rc} mit 11,07 und für die Liegeversuche mit 9,06 Watt pro Quadratmeter und Grad Celsius anzunehmen.

G. Die Wärmespeicherung S wurde aus der Änderung der Rektaltemperatur t_{re} und der mittleren Hauttemperatur $\bar{t}_s$ mit den Gewichtungsfaktoren von *Hardy* (1961) für $t_a \geq 24$ °C bei ruhig liegenden Personen berechnet als:

$$S = (0{,}8 \cdot \Delta t_{re} + 0{,}2 \cdot \Delta \bar{t}_s) \cdot m_b \cdot c_b / A_D \qquad (18)$$

Hierbei sind Δt_{re} und $\Delta \bar{t}_s$ die Differenzen der Temperaturen in °C pro h,und c_b ist die spezifische Wärme des Körpers, die seit *Pembrey* (1898) von allen Autoren mit 0,83 kcal/(kg·°C) entsprechend 0,965 Wh/(kg·°C) angegeben wird.

2. Indirekte Versuchsparameter

Die Körperoberfläche A_D im m^2 wurde nach der Formel von *Du Bois et al.* (1916) berechnet:

$$A_D = 71{,}84 \cdot 10^{-4} \cdot m_b^{0{,}425} \cdot l^{0{,}725} \qquad (19)$$

mit m_b in kg und l in cm.

Die mittlere Hauttemperatur $\bar{t}_s$ der Rhythmikversuche wurde als Summe aus neun Hauttemperaturen errechnet, die mit folgenden Gewichtungsfaktoren multipliziert wurden (*Pfleiderer und Büttner*, 1935):

$t_{st} \cdot 0{,}12$	$t_{br} \cdot 0{,}18$	$t_{ep} \cdot 0{,}16$
$t_{oa} \cdot 0{,}08$	$t_{ua} \cdot 0{,}06$	$t_{ha} \cdot 0{,}03$
$t_{os} \cdot 0{,}18$	$t_{us} \cdot 0{,}14$	$t_{fu} \cdot 0{,}05$

Die mittlere Hauttemperatur der Arbeitsversuche wurde aus den fünf gemessenen Hauttemperaturen als Mittelwert angenommen.

Der Wasserdampfdruck P_a der Umgebungsluft wurde nach *Hodgman et al.* (1960) berechnet:

$$P_a = P_{wb} - 0{,}00066 \cdot B \cdot (t_a - t_{wb}) \cdot \{1 + 0{,}00115 \cdot (t_a - t_{wb})\} \quad (20)$$

Hier ist P_{wb} der aus der Tabelle zu ermittelnde Sättigungsdampfdruck in mm Hg bei der gemessenen Feuchttemperatur und B der Luftdruck in mm Hg. Oder P_a wurde durch Multiplikation des aus der Tabelle abzulesenden Sättigungsdampfdruck P_{t_a} bei Umgebungstemperatur mit der relativen Luftfeuchte (RF) ermittelt.

Der Wasserdampfdruck der Haut P_s wurde entweder aus der Tabelle als Sättigungsdampfdruck bei $\bar{t}_s$ abgelesen, oder nach der Formel von *Fanger* (1970) in mm Hg berechnet:

$$P_s = 1{,}92 \cdot \bar{t}_s - 25{,}3 \quad (21)$$

3. Statistische Auswertung

Eine statistische Auswertung zur Absicherung der Unterschiede bei den Tag-Nacht-Vergleichen der Arbeitsversuche diente nur dazu, die intraindividuellen Schwankungen unter gewissen Annahmen einzugrenzen. Zu diesem Zweck wurde der U-Test von Wilcoxon, Mann und Whitney (*Sachs*, 1974) für t_{re}, $\dot{m}_b$ und Puls unter der Annahme durchgeführt, daß es sich bei den Stundenwerten der sechs Tag- und Nachtarbeitsintervalle um unabhän-

gige Stichproben von nicht normalverteilten Werten gehandelt habe. Es wurden dabei die jeweiligen Stundenwerte (n= 24) von Tag- und Nachtarbeit anhand von Rangzahlen und Prüfgrößen U_1 und U_2 gegenüber der Tafel auf Differenz geprüft.

Zum anderen wurde der Zeichentest von *van der Waerden und Nievergelt* (1956) unter der Annahme durchgeführt, daß es sich bei den einzelnen Stundenwerten von Tag und Nacht um gepaarte Werte handele, bei denen die Paare als voneinander unabhängig anzusehen sind.

In den Abbildungen mit Mittelwertangaben wurden zur Abschätzung der Schwankungsbreite der Standardfehler des Mittelwerts $S_{\bar{x}}$ eingezeichnet, da er eine ungefähre Abschätzung erlaubt, ob ein Unterschied zwischen zwei Werten signifikant ist oder nicht.

III) Ergebnisse

a) Vorversuche unter Behaglichkeitsbedingungen

Die *Abbildung 1* gibt eine Obersicht über die gemessenen Verläufe von Trocken-, Feucht-, Rektal-, Fuß- und Zehentemperatur sowie von Puls- und Atemfrequenz. Es wurden nur die Versuche V_1 und V_3 ausgewertet und hintereinander fortlaufend dargestellt, weil sie zur gleichen Tageszeit begonnen wurden und die VP nachts zuvor schlafen konnte. Alle Kurven bis auf die Atmung sind durch zeitlich übergreifende Dreiermittlung der vor, während und nach einer vollen Stunde gemessenen 20-Minutenwerte einmal geglättet.

Man erkennt in den oberen beiden Zeilen, daß t_{wb} häufiger und stärker als t_a schwankt. Die maximale Schwankung der Trockentemperatur beträgt weniger als 1 °C, die der Feuchttemperatur bis zu 2,3 °C. Diese Änderungen, die in dieser Höhe nur bei dieser Temperaturkonstellation (31/20 °C) auftraten, sind auf das gröbere Regulationssystem der Klimakammer für die Luftbefeuchtung zurückzuführen. Entsprechend schwankt auch die Feuchtigkeit der Luft zwischen 27% und 44% (RF-Kennzeichnung in der t_{wb}-Kurve). Schwankungen dieser Größe beeinflussen natürlich auch das thermische Gleichgewicht. Sie ändern vor allen den Verdunstungswärmestrom E und sind daher als mitbestimmende Faktoren an verschiedenen Stellen der anderen Temperaturkurven zu vermuten: Dazu gehören der Abfall der initial hohen t_{re} in V_1 bei fast gleichbleibenden peripheren Temperaturen sowie umgekehrt der parallele Anstieg von t_{wb} und t_{re} zum 1. Maximum von t_{re} in V_1 und V_3. Dazu mag auch die kurze Konstriktionsphase von t_{fu} und t_{ze} bei 2 Uhr in V_1 gehören, die mit einem Abfall der Luftfeuchte und dem nächtlichen Zwischenmaximum von t_{re} einhergeht.

In der dritten Zeile ist der Verlauf der Rektaltemperatur in 5-facher Vergrößerung gegenüber den anderen Temperaturen aufgezeichnet. Man sieht - mit den oben genannten Einschränkungen - den bekannten Tagesgang der Körper-

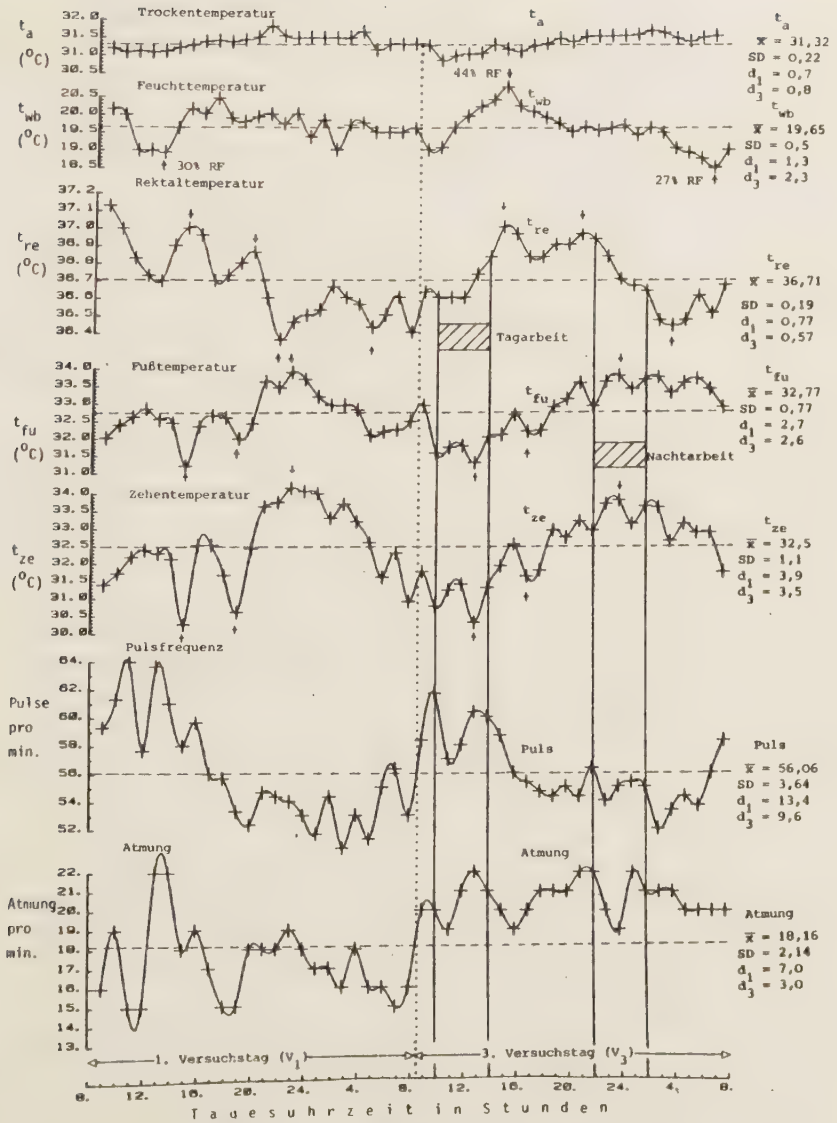

Abbildung 1: Obersicht über die Verläufe von trockener und feuchter Kammertemperatur (t_a, t_{wb}) sowie der Rektal-, Fuß- und Zehentemperatur (t_{re}, t_{fu}, t_{ze}) und von Puls und Atmung bei den Vorversuchen V_1 und V_3 (hintereinander fortlaufend gezeichnet). Nähere Erläuterungen im Text.

temperatur mit zwei Tagesmaxima (Pfeile ↑) und ein bis zwei nächtlichen Minima (Pfeile ↓). Die Tagesmaxima stimmen in ihrem in V_1 und V_3 bei 15 und bei 20 bzw. 21 Uhr gut überein. Bei den nächtlichen Minima korrespondiert das zweite bei 5 Uhr recht gut mit dem von V_3 bei 4 Uhr. Der abendliche Abfall beginnt zwischen 20 und 21 Uhr und läßt durch seine unterschiedlichen Steilheiten verschiedene Phasen der Abkühlung vermuten. Der morgendliche Anstieg beginnt zwischen 7 und 8 Uhr und ist um 15 Uhr beendet. Die Schwingungsweite d_{re} der Temperatur beträgt 0,77 °C in V_1 und 0,57 °C in V_3.

Die Extremitätentemperaturen t_{fu} und t_{ze} in der vierten und fünften Zeile zeigen angedeutet den zu erwartenden, gegensinnigen Verlauf zur Kerntemperatur, der an den Zehen ausgeprägter ist. Die Schwingungsweite ist 3-5-mal größer als die des Kerns (d_{fu} = 2,7 bzw. 2,6 °C und d_{ze} = 3,9 bzw. 3,5 °C), womit sich zugleich die Bedeutung der Endphalangen für die Wärmeregulation andeutet. Es sind zwei Tagesminima bei 15 und 19 Uhr (bzw. 13 und 17 Uhr in V_3) vorhanden, die bei V_1 gut mit den Maxima von t_{re} korrespondieren. Die nächtlichen Maxima liegen zwischen 23 und 24 Uhr, ein Zeitbereich, bei dem der Abfall von t_{re} schon begonnen hat.

Die Pulsfrequenz in der vorletzten Zeile zeigt tagsüber höhere Werte als nachts. Der Abfall auf Werte unterhalb des Tagesmittels findet jedoch ca. 4 h früher statt als bei t_{re}. Wieder ist die Schwingungsweite in V_1 größer als in V_3. Es ist zu vermuten, daß die höheren Anfangswerte aller Körpertemperaturen und des Pulses in V_1 auch durch die für die VP noch neuen Versuchsbedingungen mitbegründet ist.

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Verläufen ist bei der Atemfrequenz in der letzten Zeile keine gerichtete zeitliche Änderung feststellbar. Auch hier ist die Schwingungsweite in V_1 größer.

Als Zeitintervall, in welchem die vierstündige Arbeitsbelastung zu absolvieren war, wurden nach diesen Messungen die Abschnitte gewählt, in denen der periphere Gefäßzu-

stand über einen mehrstündigen Zeitraum relativ stationär im Zustand der Konstriktion mit niedrigen Extremitätentemperaturen bzw. der Dilatation mit höheren Temperaturen blieb. Es wurde daher für die Nachtarbeit der Zeitraum von 22 bis 2 Uhr und um 12 h versetzt die Tagesarbeit von 10 bis 14 Uhr (s. schraffierte Rechtecke in Abb.1) festgelegt. Diese Zeitintervalle fallen mit dem Abfall bzw. Anstieg der Rektaltemperatur zusammen.

b) Tagesperiodik in feucht-heißem Klima (36/30 °C)

1. Temperaturverläufe

Bei der endgültigen Versuchskonstellation mit feucht-heißem Klima gibt *Abbildung 2* einen Oberblick über die wichtigsten gemessenen Temperaturen. Aus Platzgründen wurde auf die Darstellung von Brust-, Oberarm- und Oberschenkeltemperatur verzichtet. Sie weichen nur unwesentlich von der Stammtemperatur des Epigastriums ab. Alle Stundenwerte wurden übergreifend aus je drei Stundenwerten der drei Versuchstage gemittelt. Dabei sind in den oberen vier Zeilen t_a, t_{wb}, t_{re} und $\bar{t}_s$ zur Orientierung zweimal hintereinander gezeichnet. Es folgen dann in der linken Spalte die Werte von Stirn und oberer Extremität (t_{st}, t_{ua}, t_{ha}, t_{da}) und in der rechten Spalte die von Epigastrium und unterer Extremität (t_{ep}, t_{us}, t_{fu}, t_{ze}).

Bei den Kammertemperaturen ist erneut festzustellen, daß t_{wb} stärker schwankt als t_a (d_{wb}= 0,52, d_a= 0,18 °C). Allerdings ist sie geringer als in den Vorversuchen, sodaß kein größerer Einfluß auf die Körpertemperaturen bestehen dürfte. Die relative Luftfeuchte liegt zwischen 64 und 67%. Umgekehrt ist nicht auszuschließen, daß die VP als "Störgröße" einen Einfluß auf das Feuchtigkeitsregulationssytem hat, da bei Glättung des Verlauf von t_{wb} ein annähernd paralleler Verlauf zur Rektaltemperatur vermutet werden kann. Die Rektaltemperatur zeigt den für die VP typischen Verlauf mit zwei Maxima am Tage (15 und 21 Uhr) und einem Minimum um 4 Uhr nachts. Die Schwankungsbreite ist etwas

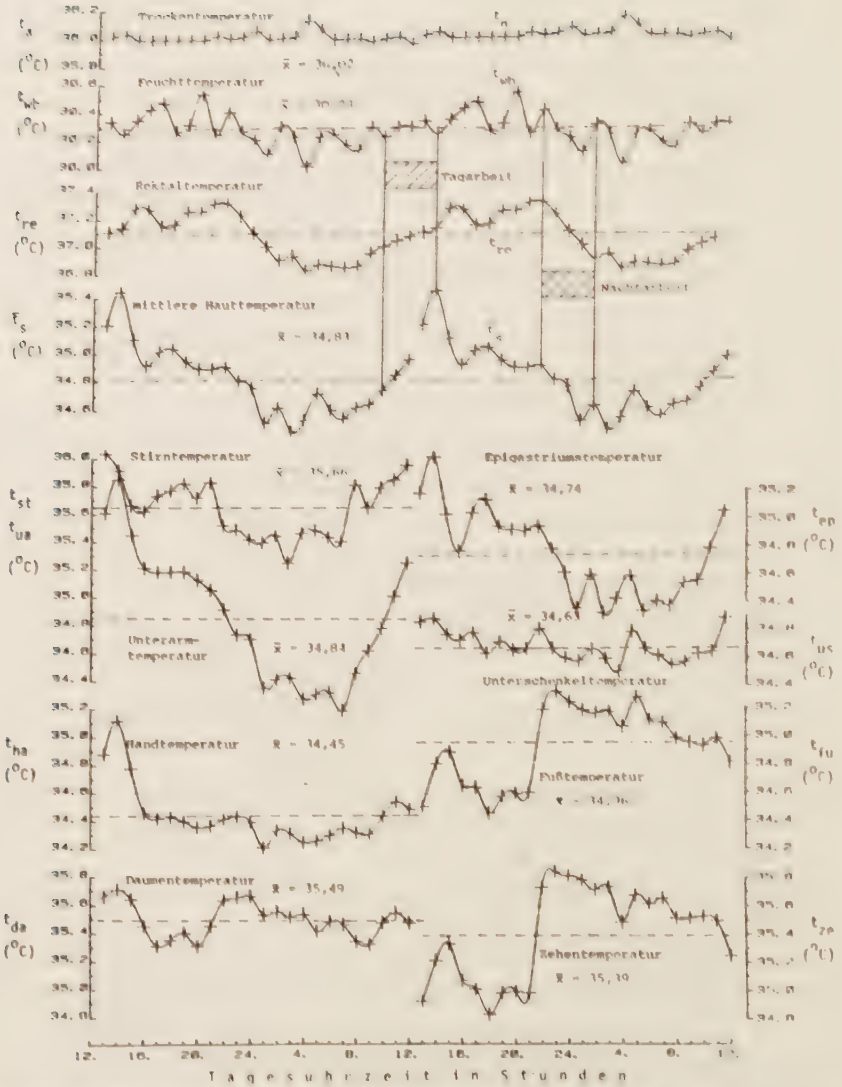

Abbildung 2: Übersicht über den Tagesgang der verschiedenen Körpertemperaturen in feucht-heißem Klima (R_1 - R_3). Oben (Zeile eins bis vier): Trocken-, Feucht-, Rektal- und mittlere Hauttemperatur - zweimal hintereinander gezeichnet. Darunter (linke Spalte): Stirn-, Unterarm-, Hand-, und Daumentamperatur, (rechte Spalte): Epigastrium-, Unterschenkel, Fuß- und Zehentemperatur. Nähere Erläuterung im Text.

geringer als in den Vorversuchen. Der abendliche Abfall beginnt um 22 Uhr, schneidet den Mittelwert um 24 Uhr und verläuft weiter linear in dem gewählten Nachtarbeitsbereich bis 2 Uhr. Der morgendliche Wiederanstieg beginnt um 7 Uhr, überschreitet die Mitte um 11^{30} und endet mit dem ersten Maximum. Die beiden Periodenhalbdauern ($\emptyset_+$ und $\emptyset_-$) sind mit 12^{20} und 11^{20} h annähernd gleich lang.

In der vierten Zeile ist die mittlere Hauttemperatur aufgetragen, wie sie sich als gewichtetes Mittel (s.S. 22) ergab. Sie liegt um durchschnittlich 2,2 °C niedriger als t_{re} und zeigt auch in ihren Extrema einen um 1 - 2 h vorverschobenen Verlauf. Auffällig ist das relativ hohe Tagesmaximum 1 h nach Versuchsbeginn, das auch bei allen anderen gemessenen Hauttemperaturen zu dieser Zeit auftritt. Es ist vermutlich durch den Wärmestau der noch unakklimatisierten VP jeweils zu Versuchsbeginn zu erklären. Durch den Wechsel vom kühleren Außenklima in die feuchte Wärme findet die VP erst nach 2 - 3 h zu einer neuen (höheren) thermischen Gleichgewichtslage. Das erklärt auch den nachfolgend auftretenden Abfall, der durch Verdunstung der nun erhöhten Schweißabgabe hervorgerufen wird.

Eine genauere Zusammenstellung der errechneten Mittelwerte $\bar{x}$, der Standardabweichung SD, der Schwingungsweite d und des Mesors (arithmetisches Mittel von Maximal- und Minimalwerten) sowie der Zeiten von Maxima und Minima, des positiven Nulldurchgangs N_+ und der positiven Phasendauer $\emptyset_+$ gibt die *Tabelle 2*.

Man sieht, daß die mittlere Stirntemperatur mit einer Differenz von ca. 1,5 °C zu t_{re} dem Kerngebiet am nächsten kommt, während z.B. die Handrückentemperatur 2,6 °C Differenz aufweist. Dazwischen liegt ein Hauttemperaturbereich (t_{br} bis t_{us}) der mit seinen Extrema um höchstens 3 h von der Rektaltemperatur abweicht und eine ähnlich lange Phasendauer hat, sodaß für dieses Hautgebiet ein mit dem Körperkern annähernd paralleler Temperaturverlauf angenommen werden kann.

Für t_{ha} und t_{da} ist dagegen kein ausgeprägter Tagesgang feststellbar. Sie liegen bei dieser Klimakonstellation in

Temperatur	Werte in °C				Uhrzeit			Stunden
	$\bar{x}$	SD	d	M	Max.	Min.	N_+	$\emptyset_+$
t_a	36,02	0,07	0,18	-	4	12	-	-
t_{wb}	30,28	0,29	0,59	30,28	20	4	?	?
t_{re}	37,09	0,19	0,48	37,08	15/21	4	0^{10}	12^{40}
t_{st}	35,66	0,34	0,78	35,65	13	3	21^{30}	14
t_{br}	34,85	0,54	1,18	34,92	14	1	22^{10}	12^{40}
t_{ep}	34,74	0,49	1,12	34,87	14	3	23^{10}	12^{20}
t_{oa}	34,86	0,59	1,78	35,07	14	6	22^{40}	11^{30}
t_{ua}	34,86	0,58	1,68	35,02	14	7	22^{10}	11^{50}
t_{ha}	34,45	0,36	0,9	34,67	14	1	-	-
t_{da}	35,5	0,26	0,42	35,51	14	20	-	-
t_{os}	34,54	0,42	1,42	34,76	14	3	22^{30}	10^{20}
t_{us}	34,63	0,26	0,4	34,63	14	4	22^{50}	11^{40}
t_{fu}	34,96	0,38	0,88	34,92	23	18	11^{20}	13^{40}
t_{ze}	35,39	0,43	1,02	35,32	23	18	11^{20}	13^{40}
$\bar{t}_s$	34,83	0,33	1,0	34,95	14	3	22^{50}	12
Pulse/min.	60,74	4,38	13,4	60,94	14	7	0^{20}	13
Atemz./min.	18,01	2,53	5,7	17,6	9	16	-	-

Tabelle 2: Mittelwerte ($\bar{x}$), Standardabweichungen (SD), Schwingungsweiten (d) und Mesoren (M) der 24 h Werte der gemessenen Temperaturen, Puls- und Atemfrequenzen der Rhythmikversuche R_1 - R_3 sowie die Uhrzeiten der Maxima, Minima und des Nulldurchgangs (N_+) und die positive Phasendauer ($\emptyset$) in Stunden.

einem Indifferenzbereich, während t_{fu} und t_{ze} den erwarteten umgekehrten Phasenverlauf mit höchsten Werten zwischen 23 und 1 Uhr und einem Tagesminimum um 18 Uhr zeigen. Letztere überschreiten ihr Tagesmittel zu einer Zeit (21^{40} Uhr), in der die meisten anderen Hauttemperaturen gerade erst abzufallen beginnen.

Die aufgrund der Kurvenasymmetrie auftretende Differenz von $\bar{x}$ und M ist bei den Hauttemperaturen im Durchschnitt sehr gering (0,08 °C), erreicht aber für t_{os} und t_{ha} 0,22 °C, d.h.15 - 24% der Schwingungsweite.

Der Puls (*Abbildung* 3) zeigt als Zeichen der vermehrten Kreislaufarbeit ebenfalls ein Maximum bei 14 Uhr und ein nächtliches Minimum bei 7 Uhr. Die mittlere Pulsrate ist um 4 Pulse/min. höher als in den Vorversuchen.

2. Wärmebilanzgrößen

Bei der Ermittlung von Stoffwechsel und Gewichtsverlust und den von ihnen abhängigen Größen $\dot{m}_s$, E_{ex} und E_s muß bemerkt werden, daß die Zahl der Messungen mit je 4 pro Versuchsperiode viel geringer war als bei den Temperaturen und der Pulsfrequenz. Aus diesem Grund sind bei den einzelnen Parametern die Tagesunterschiede der jeweiligen Mittelwerte zu einer bestimmten Tageszeit statistisch nicht zu sichern, wie es auch die Überschneidungen der jeweils eingezeichneten Standardfehler der arithmetischen Mittelwerte $S_{\bar{x}}$ in den folgenden Abbildungen anzeigen.

A. Metabolismus und Gewichtsverlust

Der Stoffwechsel wurde anhand des Ventilationsvolumens $\dot{V}_{ex}$, des Sauerstoffverbrauchs $\dot{V}_{O_2}$ und der CO_2-Abgabe $\dot{V}_{CO_2}$ ermittelt. Die Messungen wurden jeweils um 15, 22, 2 und 11 Uhr, d.h. nach unterschiedlich langen Zeitintervallen durchgeführt. Der Gewichtsverlust $\dot{m}_b$ wurde dagegen unter Berücksichtigung der Ein- und Ausfuhr alle 6 h in den Zwischenzeiten gemessen. Eine Verrechnung beider Komponenten war daher nur durch Interpolation möglich.

Die Ergebnisse zeigt *Abbildung* 3, bei der in den

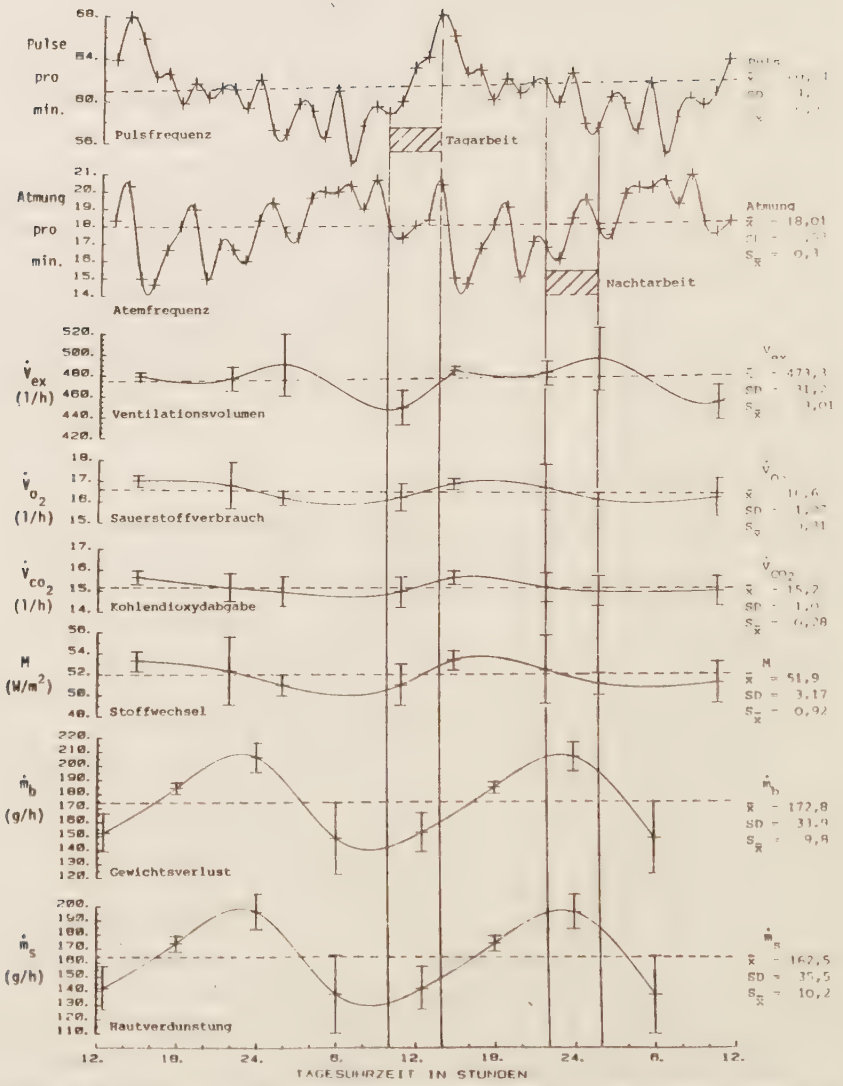

Abbildung 3: Die tagesperiodischen Änderungen der Puls- und Atemfrequenz, der Ventilation ($\dot{V}_{ex}$, $\dot{V}_{O_2}$, $\dot{V}_{CO_2}$), des Stoffwechsels (M) und der Gewichtsverluste ($\dot{m}_b$ und $\dot{m}_s$) in feucht-heißem Klima (R_1 - R_3). Bei Ventilation, Stoffwechsel und Gewichtsverlust zeitliche Mittelwerte mit ihren Standardfehlern. Alle Größen zweimal hintereinander gezeichnet. Nähere Erläuterung im Text.

ersten beiden Zeilen die Puls- und die Atemfrequenz aufgezeichnet sind. Danach folgen in Zeile drei bis fünf die Ventilationsgrößen $\dot{V}_{ex}$, $\dot{V}_{O_2}$ und $\dot{V}_{CO_2}$, in Zeile sechs der Metabolismus und den beiden letzten Zeilen die Gewichtsverluste ($\dot{m}_b$ und $\dot{m}_s$). Alle Tageskurven sind zweimal hintereinander aufgezeichnet. Bei der Atemfrequenz ist zu sehen, daß sie sich anfangs im physiologischen Bereich von 12 - 18 Zügen/min. bewegt, um dann in der zweiten Versuchshälfte ab 24 Uhr auf Werte zwischen 18 und 20 anzusteigen. Die Ventilation zeigt in diesem letzten Zeitbereich dagegen einen Abfall auf den Minimalwert. Durch diese beiden unterschiedlichen Verläufe schwankt das Atemzugsvolumen zwischen 530 (15 Uhr) 430 ml (11 Uhr) mit Zwischenwerten von 480 (22 Uhr) und 460 ml (15 Uhr) relativ stärker als das Atemminutenvolumen mit 8 l (15 Uhr) und 7,5 l (11 Uhr). Der Sauerstoffverbrauch und die CO_2-Abgabe haben beide einen zu $\dot{V}_{ex}$ gegensinnigen Verlauf. Der mittlere Sauerstoffverbrauch liegt bei 16,5 l/h (275 ml/min.), was einer O_2-Ausschöpfung von 3,5% entspricht. Die CO_2-Abgabe ist 15 l/h (250 ml/min.), was 3,2% des Ventilationsvolumens entspricht. Der RQ ist im Mittel 0,91. Der sich aus diesen Messungen ergebende Stoffwechsel M hat einen Mittelwert von 52 W/m^2 (= 80,5 kcal/h). Er liegt damit um ca. 15% oberhalb des Grundumsatzes von 44 W/m^2 (berechnet nach *Harris and Benedict*, 1919). In der vorletzten Zeile ist der Gewichtsverlust $\dot{m}_b$ aufgetragen. Hier ist im Unterschied zu den Stoffwechselgrößen ein Anstieg während der ersten Versuchshälfte und ein Abfall von 24 bis 6 Uhr zu bemerken, aufgrund dessen ein zu t_{re} analoger Verlauf vermutet werden könnte. Da die Gewichtsverluste nur summarisch alle 6 h gemessen wurden, ist eine genaue Aussage über die Lage der Extrema nicht möglich. Die höchste Differenz der so gemessenen Verluste beträgt 58 g/h bei einem durchschnittlichen Verlust von 173 g/h. In der letzten Zeile ist schließlich der nach (6) und (7) berechnete Gewichtsverlust durch Verdunstung über die Haut $\dot{m}_s$ aufgezeichnet, nachdem zuvor $\dot{m}_d$ und $\dot{m}_w$ nach (8) und (9) ermittelt worden waren. Es ergab sich ein mittlerer trockener Gewichtsver-

lust der Atmung von 6 g/h (SD = 2,7) und ein mittlerer feuchter Gewichtsverlust von 4,6 g/h (SD = 0,4) für diese Versuche. Sie lagen damit beide innerhalb der Meßungenauigkeit der Gewichts- und Umsatzbestimmungen. Der bestimmbare mittlere Gewichtsverlust durch Hautverdunstung betrug 162,5 g/h; er entspricht einem Evaporationswärmestrom nach (6) von 61 W/m^2. E_s liegt damit um ca. 10 W/m^2 höher als die von Stoffwechsel erzeugte Wärme, ein Zeichen für die bei dieser Klimakonstellation vorhandene thermische Belastung.

B. Strahlung, Konvektion und Speicherung

Zwei Ursachen dieser Belastung sind in der folgenden *Abbildung 4* zu sehen, in der neben der Kammer- und mittleren Hauttemperatur (Zeile eins und zwei), die Strahlungs- und Konvektionswärmeströme (dritte und vierte Zeile) dargestellt sind, wie sie sich nach (13) und (14) errechneten. Sie sind beide negativ, d.h. sie sind als zusätzliche Wärmezufuhr des Körpers aufzufassen, da $t_a > \bar{t}_s$ ist. R und C sind proportional dieser Temperaturdifferenz, und sie zeigen bei weitgehend konstantem Verlauf von t_a einen zu $\bar{t}_s$ umgekehrten Tagesverlauf. Zusammen beträgt die durchschnittliche Wärmezufuhr 10,7 $\pm$ 2,3 W/m^2 pro Tag, gerade soviel, wie der Verdunstungswärmestrom oberhalb des Stoffwechsels liegt. Die beiden letzten Zeilen dieser Abbildung zeigen die nach (18) errechnete Wärmespeicherung und als Vergleich dazu nochmals die Rektaltemperatur. Der Verlauf von S zeigt den bekannten Wärmestau der VP zu Versuchsbeginn mit der anschließenden überschießenden Kühlung (s. neg. S zwischen 15 und 18 Uhr), die den Tagesgang der Speicherung mit ansonsten positiver Bilanz am Tage (7 bis 22 Uhr) und nächtlicher Entspeicherung (22 bis 5 Uhr) unterbricht.

C. Evaporation

Wie bei dieser Klimakonstellation zu erwarten war, blieb die Wärmeabgabe durch Verdunstung der einzige Weg zu einer ausgeglichenen Wärmebilanz. Hierbei läßt sich E_s auf drei

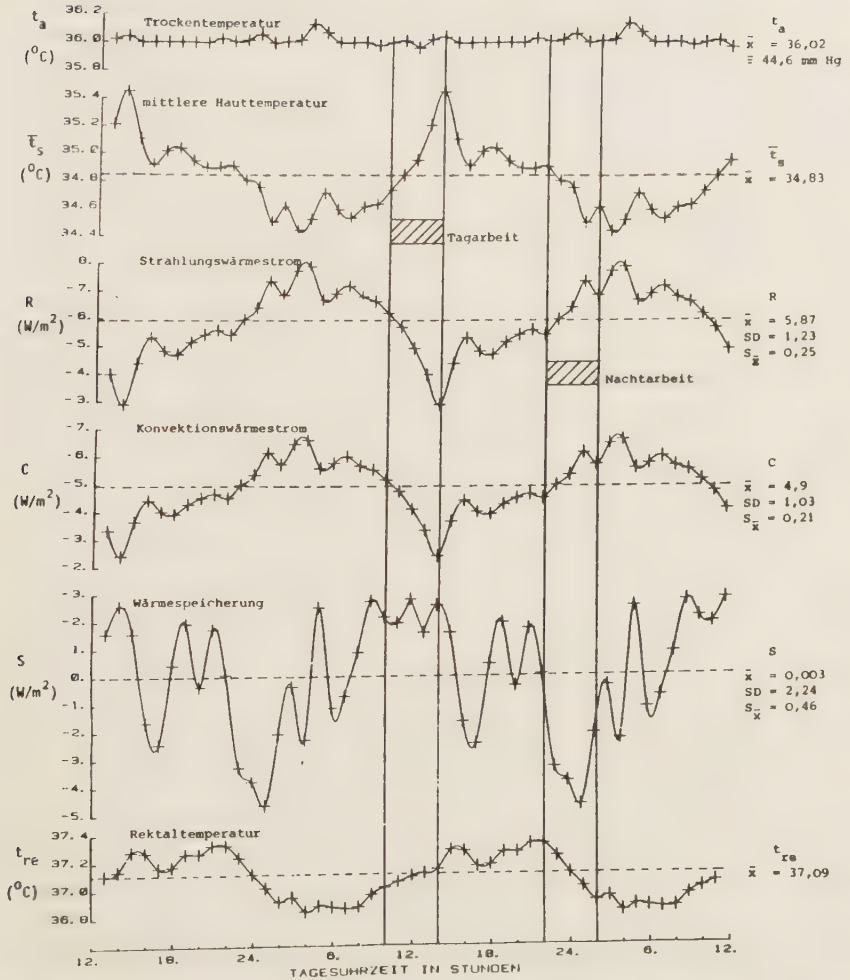

Abbildung 4: Tagesperiodischer Verlauf der Trockentemperatur (t_a), der mittleren Hauttemperatur ($\bar{t}_s$), des Strahlungs- (R) und Konvektionswärmestrom (C) sowie der Wärmespeicherung (S) und der Rektaltemperatur (t_{re}) in feucht-heißem Klima (R_1 - R_3). Alle Größen zweimal hintereinander gezeichnet. Näheres im Text.

verschiedenen Wegen berechnen (s. S. 18/19). Diese Ergebnisse sind zusammen mit t_a, P_a, P_s und E_{ex} in der *Abbildung 5* aufgezeichnet. In den oberen drei Zeilen sind neben t_a noch die beiden für die Verdunstung wichtigen Parameter P_a und P_s aufgezeichnet, wie sie sich nach (20) und aus der Tabelle ergaben. Sie zeigen daher auch einen t_{wb} resp. $\bar{t}_s$ analogen Tagesgang. Der mittlere Wasserdampfdruck der Haut liegt mit 41,8 mm Hg knapp 3 mm Hg unterhalb des Sättigungsdampfdrucks der Umgebungstemperatur (P_{t_a} = 44,6 mm Hg). Die mittlere Luftfeuchte ist bei P_a = 29,5 mm Hg 66%. Daraus ergibt sich eine Dampfdruckdifferenz von Haut zu Umgebung von durchschnittlich 12 mm Hg. Von dieser hängt die Höhe der Verdunstung ab. In der vierten Zeile ist die Wärmeabgabe über die Atemwege E_{ex} (in den Abbildungen als Verdunstung der Atemwege bezeichnet) mit grösserer Empfindlichkeit aufgezeichnet, da E_{ex} mit 1,1 W/m^2 nur ca. 1 - 2% der Wärmeverluste durch Verdunstung ausmacht. In der fünften Zeile ist E_s zu sehen, wie er sich aus der Summe der anderen Bilanzgrößen nach (1) und (3) ergibt. Er hat einen Mittelwert von 60,7 W/m^2 mit einem allerdings nicht zu sichernden Anstieg zwischen 15 und 2 Uhr und einem Abfall in der 2. Nachthälfte. Im Vergleich dazu zeigt Zeile sechs E_s, wie er sich aus den Gewichtsverlusten ergibt. Der Mittelwert von 60,6 W/m^2 stimmt sehr genau mit dem vorgenannten Wert überein, hat aber meßbedingt einen anderen (nicht zu sichernden) Tagesgang mit einem Maximum bei 22 Uhr und einem Minimum bei 15 Uhr. Die letzte Zeile zeigt dann noch die maximale Verdunstungskapazität nach (5). Ihr Wert und Verlauf ist proportional der Dampfdruckdifferenz von Haut und Umgebung und weist mit durchschnittlich 111,5 W/m^2 einen fast doppelt so hohen Betrag auf wie die zuvor erwähnten Verdunstungswärmeströme. Der Befeuchtungsgrad der Haut w nach (10) schwankt zwischen minimal 0,45 und maximal 0,65 bei 11 bzw. 22 Uhr und zeigt den regulatorischen Reservebereich der VP bei diesem Klima an.

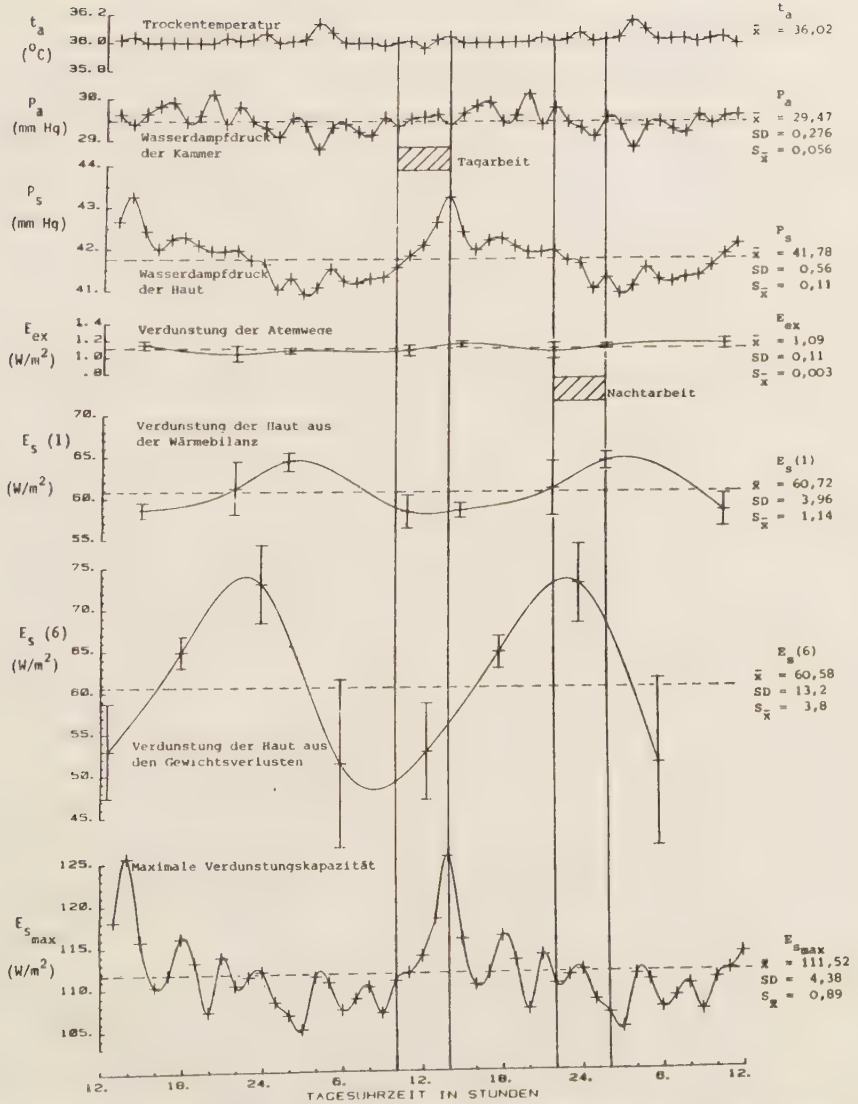

Abbildung 5: Tagesperiodischer Verlauf der Trockentemperatur (t_a), des Kammerdampfdrucks (P_a), des Hautdampfdruck (P_s) sowie der Verdunstungswärmeströme E_{ex}, $E_s(1)$, $E_s(6)$ und $E_{s_{max}}$ in feucht-heißem Klima (R_1 - R_3). Alle Größen zweimal hintereinander fortlaufend gezeichnet. E_{ex}, $E_s(1)$ und $E_s(6)$ mit zeitlichen Mittelwerten und Standardfehlern. Nähere Erläuterung im Text.

3. Tag-Nacht-Vergleich

Die im Hinblick auf die folgenden Arbeitsversuche interessierenden Zeitabschnitte von 10 bis 14 Uhr bzw. 22 bis 2 Uhr wurden genauer miteinander verglichen. In *Tabelle 3* sind diese Tages- und Nachtwerte von Temperatur, Puls, Atmung, Stoffwechsel und Wärmebilanz einander gegenübergestellt. Es sind die Tag- und Nachtmittelwerte der gemessenen Größen sowie ihre Änderung innerhalb des 4 h-Intervalls (mit $x_4 - x_1$ als Kennzeichnung der gerichteten Bewegung) und die Tag-Nachtdifferenz nebeneinandergestellt. Bei den Körpertemperaturen sind nur die in den Arbeitsversuchen registrierten Hautstellen angeführt. Sie zeigen alle einen Anstieg am Tag (pos.$\Delta x/4h$) und einen Abfall in der Nacht. Der Mittelwertvergleich zeigt für t_{re} fast keinen Unterschied, während die anderen angeführten Temperaturen nachts niedriger als am Tage sind (pos. Differenz). Die Temperaturbewegung ist bei t_{ua} und t_{os} am stärksten und wird zur weiteren Körperperipherie wieder geringer.

Wie schon Abb. 2 zu entnehmen war, zeigen nach einem Übergangsbereich (mit t_{us}, t_{ha} und t_{da}) die in der Tabelle nicht angeführten Temperaturen t_{fu} und t_{ze} einen entgegengesetzten Verlauf (t_{fu}: $\bar{x}_T$= 34,84, Δx_T= - 0,1; $\bar{x}_N$= 35,25, Δx_N= - 0,02 und t_{ze}: $\bar{x}_T$= 35,27, Δx_T= - 0,31; $\bar{x}_N$= 35,76, Δx_N= - 0,02) ohne größere Temperaturbewegung.

Puls und Atmung verhalten sich gleichsinnig zu den Temperaturen, obwohl der Unterschied bei der Atmung sehr gering ist. Die Gewichtsverluste liegen nachts um ca. 10 g/h höher, was einer Verdunstungszunahme von 3,7 W/m^2 entspricht. Wie erwähnt, sind diese und die folgenden Vergleiche nur begrenzt nutzbar. Bei den Bilanzgrößen zeigen R und C eine nächtliche Zunahme von 1 - 2 W/m^2, S dagegen eine Entspeicherung von fast 5 W/m^2. Die Verdunstungswärmeströme zeigen beide gleiche Größe und gleiches Verhalten. Ihre nächtliche Zunahme hebt die von R und C auf.

	Tageswerte (10 - 14 Uhr)		Nachtwerte (22 - 2 Uhr)		Differenz Tag - Nacht
	$\bar{x}$	$\Delta x/4h$	$\bar{x}$	$\Delta x/4h$	
			a) Temperaturen in °C		
t_{re}	37,09	0,13	37,12	-0,41	-0,03
t_{st}	35,92	0,11	35,47	-0,07	0,45
t_{br}	35,22	0,55	34,66	-0,32	0,56
t_{ua}	35,29	1,08	34,62	-0,5	0,67
t_{os}	34,61	1,25	34,4	-0,39	0,21
t_{us}	34,72	0,27	34,6	-0,15	0,12
$\bar{t}_s$	35,04	0,71	34,72	-0,29	0,32
			b) Puls und Atmung pro min.		
Puls	62,6	9	59,3	-4,3	3,3
Atmung	18,4	2,3	17,6	1	0,8
			c) Gewichtsverluste in g/h		
$\dot{m}_b$	168[1]	---	177[1]	---	-9
$\dot{m}_s$	158[1]	---	167[1]	---	-9
			d) Ventilation in l/h		
$\dot{V}_{ex}$	463[2]	---	483[2]	---	-20
$\dot{V}_{O_2}$	16,7[2]	---	16,6[2]	---	0,1
$\dot{V}_{CO_2}$	15,3[2]	---	15[2]	---	0,3
			e) Bilanzgrößen in W/m²		
R	-4,7	-3,3	-6,4	1,4	1,7
C	-4	-2,7	-5,3	1,2	1,3
S	2,2	-0,4	-2,7	-2,1	4,9
E_{ex}	1,1[2]	---	1,05[2]	---	0,05
E_s (1)	59,7[2]	---	64[2]	---	-4,3
E_s (6)	58,9[1]	---	62,3[1]	---	-3,4
M	52,2[2]	---	51,7[2]	---	-0,5
$E_{s_{max}}$	116	-15	110	-3,6	6

Tabelle 3: Vergleich der 4 h Mittelwerte ($\bar{x}$) von Tag- (10 - 14 Uhr) und Nachtzeit (22 - 2 Uhr) der Rhythmikversuche R_1- R_3 mit ihren Veränderungen in diesen Zeitintervallen ($\Delta x/4h = x_4 - x_1$) und den Tag-Nacht-Differenzen ($\bar{x}_T - \bar{x}_N$).

[1] Mittelwert für den Tag aus 12^{30} und 18 Uhr, für Nacht aus 24 und 6 Uhr Werten.

[2] Mittelwert für den Tag aus 11 und 15 Uhr, für Nacht aus 22 und 2 Uhr Werten.

c) Arbeitsversuche

1. Die Änderungen der Tageswerte im Verlauf der Akklimatisation

Zur Darstellung des Umstellungsprozesses bei zusätzlicher Arbeit in feucht-heißem Klima sind in *Abbildung 6* die Mittelwerte der einzelnen Arbeitsstunden von Klima-, Rektal- und mittlerer Hauttemperatur, sowie vom Gewichtsverlust und Pulsfrequenz mit ihren Standardfehlern untereinander aufgetragen. Dabei sind die Werte der einzelnen Wochen nebeneinander aufgeführt, um Änderungen im Verlauf der Zeit zu erfassen.

In der obersten Zeile ist die Trockentemperatur zu sehen, die ohne große Abweichungen sehr gut auf 36 °C einreguliert ist. Die Feuchttemperatur in der zweiten Zeile zeigt dagegen erheblich größere Schwankungen. Bei ihr stellt vor allem der 1. Stundenwert einen Ausreißer dar, da mit dem Beginn der zusätzlichen Luftbefeuchtung durch die Schweißabgabe das Regelsystem überfordert war. Aus diesem Grunde traten Tagesunterschiede bis zu 1,6 °C auf, was einer Luftfeuchtigkeitsschwankung von 71 auf 63% RF entspricht.

In der dritten Zeile ist die Rektaltemperatur angeführt, die insgesamt gegenüber den Rhythmikversuchen stark erhöht ist. Der Unteschied ist in der ersten Woche am größten mit 1,46 °C. Aber wie ein Vergleich der einzelnen Wochenmittel zeigt, kommt es von der ersten bis zur dritten Woche zu einem Abfall der Mittelwerte von fast 0,3 °C. Des weiteren ist mit zunehmender Arbeitszeit ein Anstieg zu beobachten. Doch als Ausdruck der zunehmenden besseren Wärmeabfuhr wird dieser Anstieg von Woche zu Woche geringer. Beträgt er in der ersten Woche noch 0,3 °C, so ist er in der dritten Woche auf 0,12 °C gefallen. Letzteres ist genau der Betrag, der auch allein durch die Tagesperiodik in dieser Zeit verursacht wird (s. Tabelle 3).

In der vierten Zeile ist die mittlere Hauttemperatur aufgetragen. Sie ist im Gegensatz zu t_{re} gegenüber den Rhythmikversuchen nur geringfügig erhöht. Sie liegt in der ersten Woche um 0,34 °C höher, danach beträgt sie nur noch

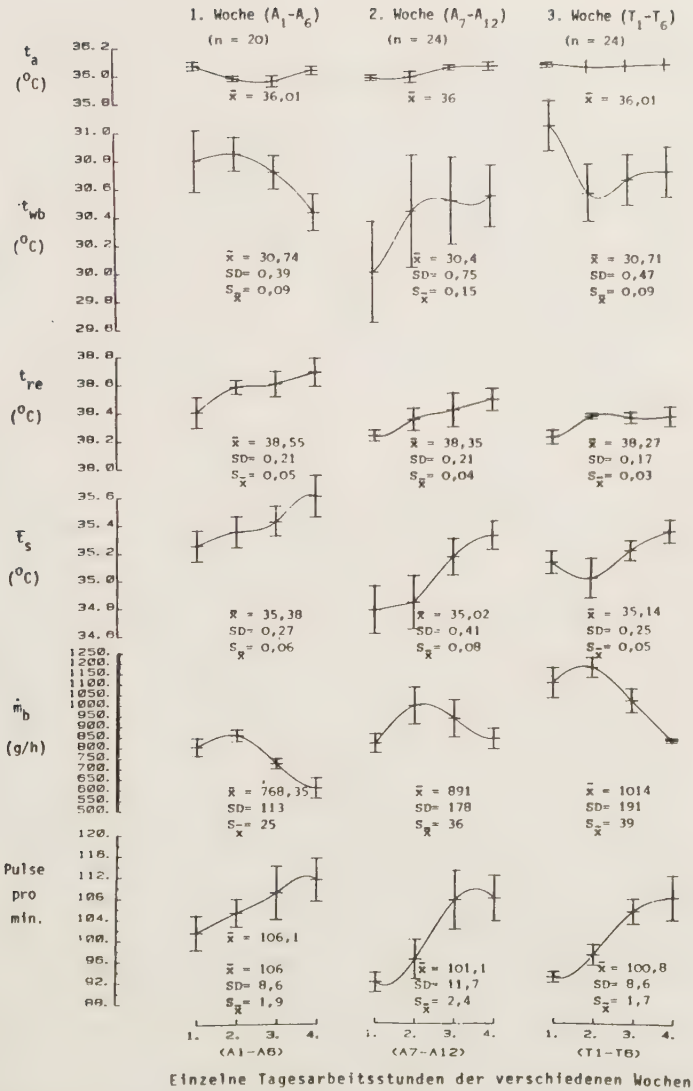

Abbildung 6: Wochenweise Darstellung der Kammertemperaturen (t_a, t_{wb}), der Rektal- (t_{re}) und mittleren Hauttemperatur ($\bar{t}_s$) sowie des Gewichtsverlusts ($\dot{m}_b$) und der Pulsfrequenz in feucht-heißem Klima (A_1- A_6, A_7- A_{12} und T_1- T_6). Stundenmittelwerte von je 6 Tagen mit Standardfehlern. Weitere Angaben im Text.

0 bis 0,13 °C. Hierbei dürfte die leichte Mittelwertserhöhung der dritten gegenüber der zweiten Woche eher ein Ausdruck der erhöhten Feuchttemperatur und vom Anpassungsvorgang abzutrennen sein. Ansonsten zeigt $\bar{t}_s$ während der Arbeitszeit ebenfalls einen Anstieg, der jedoch in der 2. und 3. Woche durch den 2. Stundenwert unterbrochen wird. Der Anstieg repräsentiert die sich in die Peripherie ausbreitende Kerntemperatur mit zunehmender Wärmelast. Ein Vergleich der Wochenmittelwerte mit denen von t_{re} zeigt, daß die Differenz von Kern und Peripherie dabei konstant zwischen 3,1 und 3,3 °C bleibt. Doch der Abfall der Wochenmittel von t_{re} und $\bar{t}_s$ läßt in Bezug auf die Rhythmikversuche nach (18) eine zusätzliche Wärmelastverminderung errechnen, die von 44 W/m^2 in der ersten Woche auf 34,5 W/m^2 in der zweiten und dritten Woche fast 10 W/m^2 beträgt.

In der fünften Zeile ist der Gewichtsverlust aufgetragen, der in erster Näherung unter Vernachlässigung der Atemwegsverluste von ca. 5% mit der Schweißabgabe gleichzusetzen ist. $\dot{m}_b$ zeigt eine von Woche zu Woche zunehmende Schweißproduktion. Sie liegt um das 5-6-fache höher als bei den Rhythmikversuchen und zeigt im Unterschied zu den Temperaturen einen Verlauf mit einem jeweiligen Maximum in der 2. Arbeitsstunde. Dieses Maximum kann wie bei einer überschießenden Regulation durch die damit verbundene stärkere Kühlung den geringeren Anstieg von $\bar{t}_s$ in der 2. Stunde erklären. Diese Verringerung der Schweißmenge nach der 2. Stunde könnte auf eine Ermüdung der Schweißdrüsen hindeuten und muß noch nicht den endgültigen Endpunkt der Akklimatisation bedeuten. So beobachtete *Laaser* (1968) bei längerer und höherer Hitzelast eine zeitliche Verschiebung des Maximums von der 2. zur 3. Arbeitsstunde.

In der letzten Zeile ist die Pulsfrequenz als Kenngröße der kardiovaskulären Belastung angeführt. Sie liegt bei dieser Arbeit um ca. 40 Schläge höher als in Ruhe und zeigt wie die Temperaturen mit zunehmender Arbeitsdauer einen entsprechenden Anstieg. Auch der Abfall der Wochenmittelwerte ist bereits in der 2. Woche vollzogen. Schließlich unterscheiden sich auch die Anstiegscharakteristiken

der ersten von denen der beiden folgenden Wochen: Nimmt in der ersten Woche die Pulsfrequenz noch linear von Stunde zu Stunde zu, so sind in der zweiten und dritten Woche die beiden ersten Arbeitsstunden von den folgenden zu trennen, da die größte Zunahme nach der zweiten Stunde erfolgt. Diese Zunahme von ca. 10 Pulsen/min. kann im Zusammenhang mit der Abnahme der Schweißmenge nach der zweiten Stunde als Ausdruck der nun notwendig größeren Kreislaufarbeit gewertet werden, wodurch es gelingt den Anstieg von t_{re} geringer zu halten und die Ausbreitung in die Peripherie (zu sehen am stärkeren Anstieg von $\bar{t}_s$ nach der 2. Stunde) zu beschleunigen.

2. Tag- und Nachtarbeit

A. Rektal- und Hauttemperatur, Gewichtsverlust und Pulsrate

Die wesentlichen Unterschiede zwischen Tag- und Nachtarbeit sind in *Abbildung 7* aufgeführt. Sie zeigt die Kammer-, Rektal- und mittlere Hauttemperaturen sowie die Gewichtsverluste und die Pulsfrequenz bei Tage und in der Nacht. Zum besseren Vergleich sind auch die zeitlich entsprechenden Verläufe der Rhythmikversuche als gepunktete Linien in die jeweiligen Kurven eingezeichnet. Ferner sind die Werte der Ruhestunden (R-Markierungen auf der Abzisse) vor und nach dem Arbeitsintervall (gestrichelte Linien) angeführt. Hinter den Buchstaben A bzw. R sind die jeweiligen 4h-Mittelwerte der Arbeits- bzw. Ruheversuche angegeben.

In den ersten beiden Zeilen sind t_a und t_{wb} aufgezeichnet. t_{wb} zeigt mit Beginn der Arbeit einen zusätzlichen Anstieg von 0,26 bis 0,4 °C gegenüber den Rhythmikversuchen.

In der dritten Zeile werden die Rektaltemperaturen verglichen . Zeigt sich am Tage noch der schon beschriebene Anstieg zur 2. Stunde mit der nachfolgenden Stabilisierung bei 38,3 °C, so ist nachts der Anstieg ganz gering (37,98 auf 38,02 °C) geworden und fällt in der 3. und 4. Arbeitsstunde dann ähnlich wie bei den Ruheversuchen auf 37,95 bzw. 37,88 °C ab. Dadurch ergibt sich im Stundenmittel ein um 0,3 °C tieferes Niveau bei Nachtarbeit, während sich bei den Liegeversuchen nur die Verlaufsrichtung nicht aber der Mit-

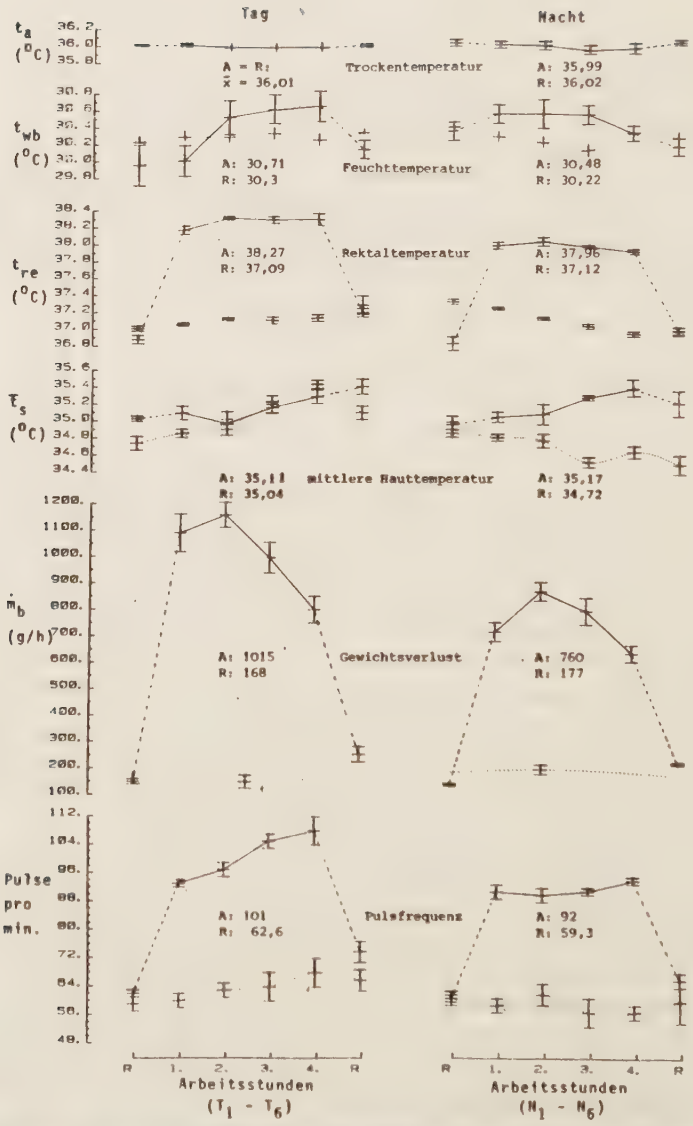

Abbildung 7: Der Verlauf der Stundenmittelwerte mit Standardfehlern von Kammer-
temperaturen (t_a,t_{wb}), Rektal- (t_{re}) und mittlerer Hauttemperatur ($\bar{t}$
sowie des Gewichtsverlusts ($\dot{m}_b$) und der Pulsfrequenz bei Tag- (T_1- T
und Nachtarbeit (N_1- N_6) in feucht-heißem Klima (durchgezogene Lini
R = Werte vor und nach Arbeit (gestrichelte Linien). Gepunktete Lin
als Vergleichswerte der Rhythmikversuch R_1 - R_3.

telwert ändert. Man kann also feststellen, daß der Körperkern bei gleichem Klima und gleicher Arbeit nachts weniger aufgeheizt wird.

Im Gegensatz dazu zeigt die mittlere Hauttemperatur in der vierten Zeile ein umgekehrtes Verhalten. Hier differieren die 4 h-Mittelwerte bei Arbeit zwischen Tag und Nacht nur sehr gering, und sie zeigen beide einen ähnlichen Verlauf mit dem schon beschriebenen Anstiegsknick nach der 2. Stunde. Die Ruhewerte unterscheiden sich dagegen sehr wohl, und so kommt es, daß der Unterschied zwischen Ruhe und Arbeit am Tage sehr gering ist (0,1 ^{o}C), während er des nachts fast 0,5 ^{o}C beträgt. Hier deutet sich eine Ursache der nächtlich tieferen Kerntemperatur an, die nachts kühlere Schale kann eine größere Wärmeaufladung erfahren. Rechnet man nach (18) die sich ergebende durchschnittliche Wärmeaufladung bei Arbeit aus, so ergibt sich, daß tagsüber eine zusätzliche Wärmespeicherung von 34,4 W/m^2 besteht, während sie nachts 27,4 W/m^2 beträgt. D.h. die nächtlich größere Aufladung der Peripherie reicht allein nicht aus, die viel geringere Kerntemperatur zu erklären.

In der fünften Zeile ist der Vergleich der stündlichen Gewichtsverluste aufgetragen. Hier ist in Ruhe - wie schon erwähnt - bei ca. 170 g/h kein Tag-Nacht-Unterschied zu sichern. Aber bei Arbeit mit einer nun vielfachen Schweißmenge tritt ein deutlicher Unterschied von Tag und Nacht auf. Des nachts liegen die Schweißmengen, die hier unter Vernachlässigung der Atemwegsverdunstung dem Gewichtsverlust gleichgesetzt werden, mit 760 g/h um 25% signifikant niedriger als am Tage. Die nächtliche Verringerung entspräche bei völliger Verdunstung nach (6) einer Einsparung von 95 W/m^2. Der Verlauf innerhalb eines Arbeitsintervalls bleibt davon unberührt; das Maximum der Gewichtsverluste liegt in der 2. Stunde, danach fallen sie in der verbleibenden Arbeitszeit unter die Anfangswerte ab.

Die letzte Zeile zeigt die Pulsfrequenz. Hier liegt der Puls in Ruhe bei den Liegeversuchen und in Ruhe vor der Arbeit bei bradykarden Werten um 60 pro min. mit nur geringen nicht zu sichernden Tag-Nacht-Differenzen von 5 Pulsen pro

min. Eine nächtliche Verlangsamung des Pulses ist aber genauso bekannt wie die nächtliche Abnahme des Schlagvolumens, der glomerulären Filtrationsrate, des Hämatokrits, sowie des arteriellen und venösen Blutdrucks, während die zirkulierende Blutmenge ansteigt (Obersicht bei *Menzel*, 1962). Von daher ist anzunehmen, daß eine solche Kreislaufumstellung auch hier vorliegt. Bei Belastung durch zusätzliche Arbeit steigt die Herzfrequenz um ca. 50% auf Werte von 93 (Tag) bzw. 91 (Nacht) an. In den folgenden Arbeitsstunden ist tagsüber eine stetige Zunahme der Pulsfrequenz auf 99, 107 und 112 zu beobachten , aber nachts bleibt eine solche weitere Erhöhung aus. Die Pulsfrequenz bleibt mit 92, 92 und 95 Schlägen konstant. Der Kreislauf wird also nachts bei dieser Arbeit weniger belastet als am Tage.

Um die Belastung durch die vorgegebene Arbeit von 78,5 Watt für die VP genauer abzuschätzen, kann man sie auf die submaximale Arbeitskapazität beziehen. Diese submaximale Arbeitskapazität (physical work capacity), d.h. die Arbeit, welche für drei Minuten bei einer Pulsfrequenz von 170 in einem relativen "steady state" von Atmung und Puls absolviert wird, liegt nach *Bühlmann* (1965) bei 180 Watt. Unter Vernachlässigung der Klimabelastung bedeutet das für die VP eine Belastung weniger als 50%.

B. Die einzelnen Hauttemperaturen

Ein genaueres Muster der Wärmeaufladung einzelner Körperregionen während der Arbeit ergibt sich aus der Aufstellung der einzelnen gemessenen Hauttemperaturen. Diese sind deshalb zusammen mit der sich aus ihnen ergebenden mittleren Hauttemperatur in *Abbildung 8* aufgeführt. Wieder sind die Arbeitsversuche (durchgehende Linien) mit den dazugehörigen Werten der Ruheversuche vor und nach der Arbeit (gestrichelte Linien) zum einen und die Temperaturverläufe der Ruheversuche im gleichen Zeitraum (gepunktete Linien) zum anderen mit eingezeichnet. Die angegebenen Schwankungen geben den Standardfehler des Mittelwerts wieder.

In der obersten Zeile ist als erstes die schon bespro-

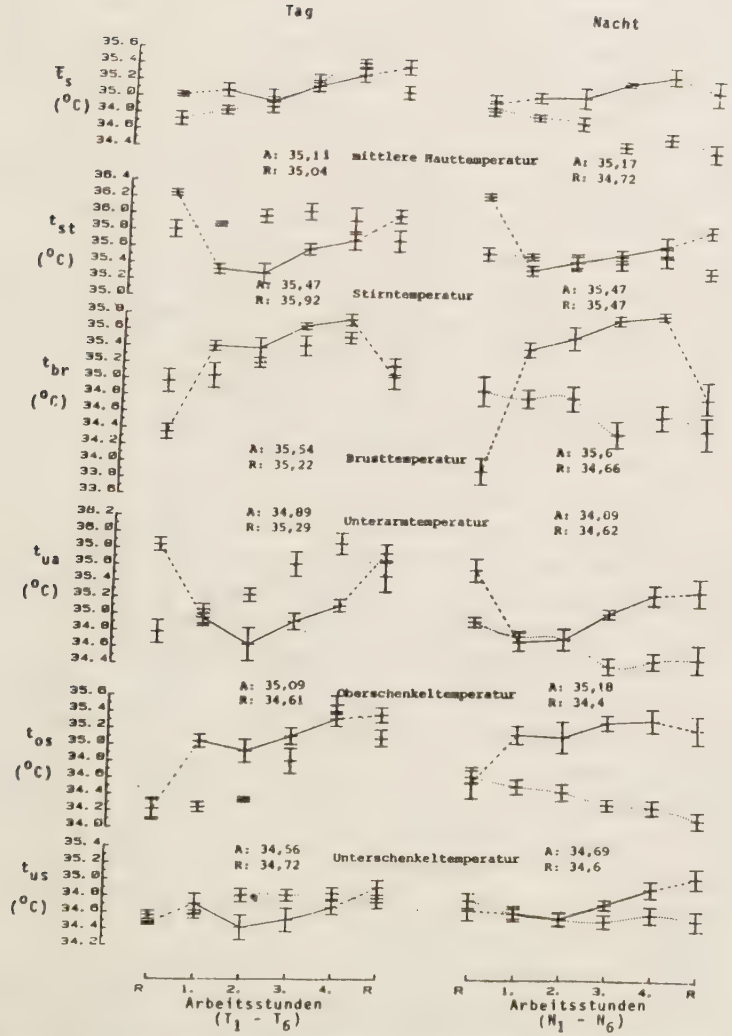

Abbildung 8: Der Verlauf der Stundenmittelwerte mit Standardfehlern von mittlerer Hauttemperatur, Stirn-, Brust-, Unterarm-, Oberschenkel- und Unterschenkeltemperatur bei Tag- (T_1- T_6) und Nachtarbeit (N_1- N_6) in feuchtheißem Klima (durchgezogene Linien). R = Werte vor und nach Arbeit (gestrichelte Linien). Gepunktete Linien als Vergleichswerte der Rhythmikversuche R_1- R_3.

chene mittlere Hauttemperatur angeführt. Ihr Muster mit den relativ gleichen Arbeitstemperaturen bei bekannten nächtlich erniedrigten Ruhewerten muß sich auch in den einzelnen Hautarealen wiederfinden. Tatsächlich ist die Differenz an allen gemessenen Hautstellen bei Arbeit gering, ihr Maximum beträgt bei t_{us} 0,13 °C. Die Ruhewerte zeigen dagegen die schon in *Tabelle 3* aufgeführten Differenzen (Maximum bei t_{ua} 0,67 °C). Im Obrigen zeigen auch alle Arbeitskurven im einzelnen die Diskontinuität in ihrem Verlauf nach der 2. Stunde, die mit dem Maximum der Schweißabgabe zusammenfällt.

Bei der Stirntemperatur (zweite Zeile) liegt der Ruhewert tagsüber um 0,45 °C höher, während er des nachts mit dem Arbeitswert identisch ist. Die Stirn zeigt mit ihrer hohen Durchblutung einen dem Körperkern analogen Tagesgang. Sie wird bei Tagarbeit durch Schweiß vermehrt gekühlt und kann auch nachts keine weitere Wärme aufnehmen.

Bei der Brusttemperatur in der dritten Zeile kommt es tagsüber - vielleicht unter dem Einfluß der vermehrten Haltearbeit von Arm- und Brustkorbmuskulatur - bei Belastung zu einem um 0,32 °C höheren Durchschnittswert. Da die Ruhetemperatur nachts jedoch um fast 1 °C niedriger liegt, ist hier ein Bereich, der zusätzlich Wärme aufnehmen kann.

Bei den Unterarmtemperaturen (vierte Zeile) besteht am Tage wieder eine ähnlich Situation wie bei der Stirn; die Arbeitstemperatur ist um 0,4 °C kühler am Tage als in Ruhe. Ein Umstand, der vielleicht durch die effektivere Verdunstung der Extremitäten ermöglicht wird. Da die Ruhewerte nachts aber noch 0,27 °C niedriger als die Arbeitswerte liegen, wird dann auch bei ihnen eine geringere Kühlung und eine größere Wärmeaufladung möglich.

Der Oberschenkel, die wesentlichste Wärmekraftmaschine, ist mit seinen Temperaturverläufen in der fünften Zeile aufgezeichnet. Wieder sind die Arbeitstemperaturen fast gleich, da aber die Ruhetemperatur nachts um 0,78 °C niedriger als die der Arbeit liegt (gegenüber 0,48 °C bei Tage), wird auch hier nachts eine zusätzliche Wärmespeicherung möglich.

Mit den Unterschenkeltemperaturen in der letzten Zeile stoßen wir dann in einen Bereich vor, in dem sich Ruhe-

	Tag (T_1 - T_6)							Nacht (N_1 - N_6)							Differenz
	R	1.h	2.h	3.h	4.h	R	$\bar{x}_T$	R	1.h	2.h	3.h	4.h	R	$\bar{x}_N$	$\bar{x}_T - \bar{x}_N$
	a) Temperaturen in °C														
t_{re}	36,88 ±0,05	38,18 ±0,05	38,32 ±0,02	38,3 ±0,04	38,3 ±0,07	37,2 ±0,05	38,27	36,83 ±0,08	37,98 ±0,04	38,02 ±0,05	37,95 ±0,02	37,88 ±0,03	36,93 ±0,05	37,96	0,31
t_{st}	36,25 ±0,04	35,33 ±0,06	35,28 ±0,12	35,58 ±0,07	35,68 ±0,11	35,98 ±0,08	35,47	36,23 ±0,04	35,33 ±0,06	35,43 ±0,1	35,51 ±0,06	35,61 ±0,11	35,76 ±0,08	35,47	0
t_{br}	34,35 ±0,09	35,4 ±0,06	35,38 ±0,12	35,65 ±0,04	35,73 ±0,07	35,03 ±0,14	35,54	33,89 ±0,16	35,38 ±0,09	35,52 ±0,14	35,73 ±0,06	35,78 ±0,05	34,75 ±0,22	35,6	-0,06
t_{ua}	35,84 ±0,08	34,95 ±0,1	34,63 ±0,2	34,91 ±0,1	35,1 ±0,08	35,74 ±0,11	34,89	35,54 ±0,14	34,67 ±0,11	34,69 ±0,13	35,0 ±0,06	35,22 ±0,12	35,25 ±0,17	34,89	0
t_{os}	34,22 ±0,13	35,04 ±0,8	34,92 ±0,14	35,1 ±0,1	35,31 ±0,09	35,36 ±0,09	35,09	34,54 ±0,19	35,12 ±0,11	35,09 ±0,19	35,26 ±0,09	35,28 ±0,14	35,16 ±0,17	35,18	-0,09
t_{us}	34,47 ±0,02	34,71 ±0,12	34,42 ±0,15	34,51 ±0,14	34,66 ±0,08	34,9 ±0,09	34,56	34,64 ±0,12	34,61 ±0,06	34,55 ±0,08	34,72 ±0,06	34,91 ±0,1	35,04 ±0,12	34,69	-0,13
$\bar{t}_s$	35,03 ±0,03	35,1 ±0,08	34,98 ±0,14	35,17 ±0,07	35,3 ±0,08	35,42 ±0,09	35,11	34,97 ±0,1	35,05 ±0,06	35,08 ±0,12	35,27 ±0,03	35,37 ±0,09	35,18 ±0,15	35,17	-0,06
	b) Gewichtsverlust in g/h														
$\dot{m}_b$	150 ±10	1092 ±72	1163 ±48	1000 ±58	804 ±51	260 ±29	1015	148 ±6	723 ±36	876 ±35	801 ±51	642 ±31	229 ±5	760	255
	c) Pulsfrequenz pro min.														
Puls	62 ±1	93 ±1	97 ±2	105 ±2	108 ±4	74 ±3	101	61 ±2	91 ±2	90 ±2	91 ±1	94 ±1	66 ±2	92	9

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Stundenmittelwerte der gemessenen Temperaturen (t_{re}, t_{st}, t_{br}, t_{ua}, t_{os}, t_{us} und $\bar{t}_s$), der Gewichtsverluste ($\dot{m}_b$) und der Pulsfrequenz der Tag- (T_1 - T_6) und Nachtarbeit (N_1 - N_6). Einzelne Angaben sind Mittelwerte aus den 6 Stundenmitteln der einzelnen Versuchstage mit ihren Standardfehlern. R = Werte vor und nach Arbeitsbelastung. $\bar{x}_T$ und $\bar{x}_N$ = 4h Mittelwerte der Tag- bzw. Nachtarbeit. $\bar{x}_T - \bar{x}_N$ = Tag-Nacht-Differenz.

und Arbeitstemperatur am Tage und in der Nacht nicht mehr wesentlich unterscheiden. Bei Temperaturen zwischen 34,5 und 34,7 °C haben wir eine Körperregion erreicht, in der weder der Tagesgang noch die Arbeitsbelastung größere Differenzen in der Wärmeabfuhr erkennen lassen. Wie in den Rhytmikversuchen dargestellt, kommt es in den weiter peripher gelegenen Gebieten zu einer Umkehr der Temperaturrhythmik. Es wäre interessant, in diesen Hautgebieten die Temperaturen auch bei Arbeitsbelastung zu messen. Dies war leider nicht möglich, da die Fixierung der Thermoelemente an Hand, Fuß und den Phalangen nur bei größerer Meßungenauigkeit und mit stärkerer Beeinträchtigung der VP durchzuführen war. Abschließend gibt *Tabelle 4* eine genauere Obersicht der einzelnen mittleren Stundenwerte von Tag- und Nachtarbeit aller gemessenen Hauttemperaturen sowie der Rektaltemperatur, des Gewichtsverlustes und der Pulsfrequenz.

C. Stoffwechsel

Die Ergebnisse der Stoffwechselmessungen der Arbeitsversuche sind in *Abbildung 9* mit den Vergleichswerten der Rhythmikversuche aufgeführt. Es sind nebeneinander Ventilation, Sauerstoffverbrauch, Kohlendioxydabgeabe und Arbeitsumsatz mit Tag- und Nachtwerten aufgetragen. Die Messungen bei Arbeit wurden im Verlauf der 2. Arbeitssunde durchgeführt, da dort aufgrund der Gewichtsverluste ein Maximum vermutet wurde. Es sind die Mittelwerte von zwei Tages- (A_8 und T_4) und drei Nachtmessungen (N_4, N_5 und N_6) mit ihren Standardfehlern angegeben.

Man erkennt in der ersten Reihe, daß die Ventilation bei Arbeit auf 1600 l/h ansteigt, bei Ruhewerten um 470 l/h. Es bestehen jedoch keine Unterschiede zwischen Tag und Nacht. Die Streuung der beiden Tageswerte ist sehr groß, da sie aus zwei sehr unterschiedlichen Werten von A_8 und T_4 (1300 und 1900 l/h, s. Tabelle 5) herrührt. Es zeigt sich auch eine sehr unterschiedliche Sauerstoffausnutzung dieser beiden Versuchstage: A_8 = 5,5 Vol.% und T_4 = 4 Vol.%. Zudem lag die Feuchttemperatur am Versuchstag A_8 auf durchschnittlich 29,6 °C mit einem um 1-1,5 mm Hg niedrigerem Wasser-

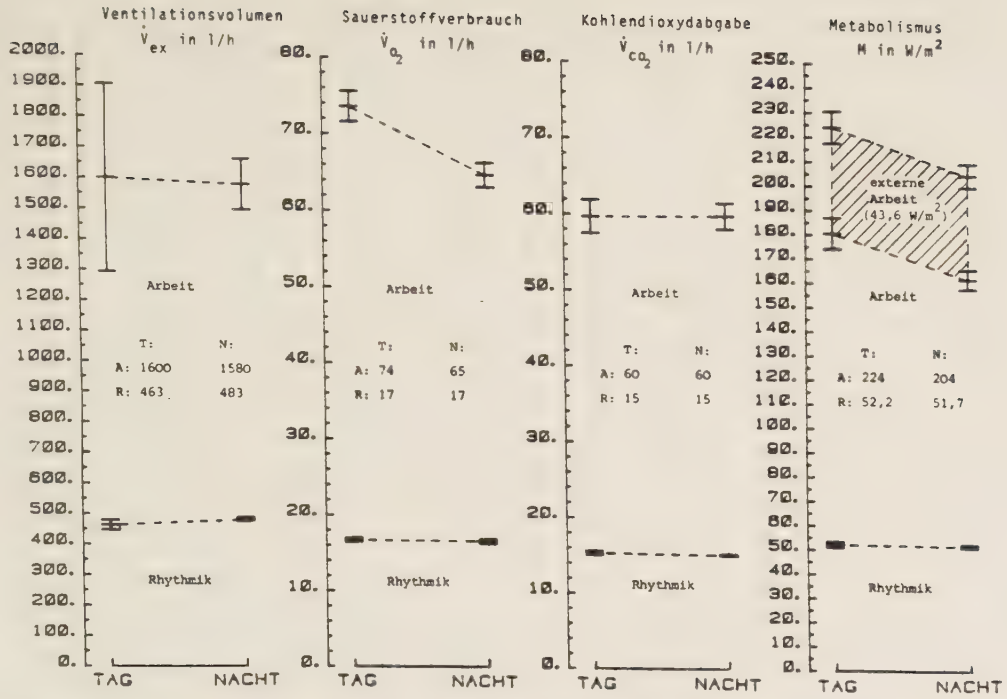

Abbildung 9: Gegenüberstellung der Tag- und Nachtwerte von Ventilationsvolumen, Sauerstoffverbrauch, Kohlendioxydabgabe und Metabolismus bei Arbeits- und Rhythmikversuchen in feucht-heißem Klima (36/30 °C). Arbeitsversuche sind Mittelwerte aus 2 bzw.3 Messungen der 2. Arbeitsstunde von A_8 und T_4 (Tag) bzw. N_4, N_5, N_6 (Nacht) mit ihren Standardfehlern.

dampfdruck der Umgebung. Durch die stark gesteigerte Ventilation bei Arbeit ergibt sich eine erhöhte Atemwegsverdunstung. Nach (4) errechnet sich E_{ex} für den Tag mit durchschnittlich 3,9 W/m^2 und für die Nacht mit 3,4 W/m^2.

Die zweite Reihe zeigt den Sauerstoffverbrauch, der bei Arbeit ebenfalls auf rund das vierfache der Ruhewerte ansteigt. Hier liegen die Tageswerte jedoch um 9 l/h höher als die Nachtwerte. Das entspricht bei unveränderte CO_2-Abgabe, wie sie im wesentlichen in der nächsten Spalte zu beobachten ist, nach (2) einem um 22 W/m^2 höherem Arbeitsumsatz am Tage. Die auf Minuten umgerechneten Werte des O_2-Verbrauchs betragen 1,23 l/min. (Tag) und 1,08 l/min. (Nacht). Nimmt man diese Werte und die dabei auftretenden Pulsraten (hier 100 pro min.), so kann man daraus die maximale Sauerstoffaufnahme und dann die maximale Arbeitskapazität der VP bestimmen, zwei Werte, die im anglo-amerikanischen Schrifttum die wesentlichen ergometrischen Bestimmungsgrößen sind. Nach einem Nomogramm von Åstrand (1970) ergibt sich $V_{O_{2max}}$ mit 4,0 l/min. (Tag) bzw. 3,8 l/min. (Nacht). Das entspricht bei gleichbleibender CO_2-Abgabe einer maximalen Arbeitskapazität von 263 bzw. 256 Watt. Die Sauerstoffaufnahme bzw. Arbeitsbelastung betragen damit rund 30% der maximalen Kapazität, was mit der Erfahrung übereinstimmt, daß eine mehrstündige Arbeitsbelastung nur in einem Bereich unter 50% der maximalen Sauerstoffaufname ohne vorzeitige Erschöpfung der VP möglich ist.

Die dritte Reihe zeigt die CO_2-Abgabe, bei der - wie schon erwähnt - bei Arbeit keine Tag-Nacht-Unterschiede bestehen. Im Zusammenhang mit der nächtlich niedrigeren O_2-Aufnahme läßt sich daraus eine Änderung des RQ ablesen, der von 0,81 am Tage auf 0,91 bei Nacht ansteigt. Die Gründe dafür sind diesen Versuchen nicht zu entnehmen. Dieser Anstieg entspricht jedoch der Beobachtung, daß nachts das Blut-pH sinkt (Menzel, 1960), was entweder durch eine Anhäufung saurer Stoffwechselprodukte oder durch eine Änderung der Lungenventilation mit vermehrten intrapulmonalen Kurzschlüssen verursacht sein kann.

Versuchstag	$\dot{V}_{ex}$(l/h)	$\dot{V}_{O_2}$(l/h)	$\dot{V}_{CO_2}$(l/h)	RQ	M (W/m^2)	M-W (W/m^2)	$\eta = \frac{W}{M}$
A_8, 2.h	1293,45	71,63	57,47	0,8	217,8	174,2	0,2
T_4, 2.h	1905,94	75,59	61,9	0,82	230,8	187,2	0,19
Ø Tagarbeit	1600	73,6	59,7	0,81	224,3	180,7	0,195
N_4, 2.h	1685,74	63,37	59,18	0,91	203,8	160,2	0,21
N_5, 2.h	1637,69	67,93	63,05	0,93	212,98	169,4	0,2
N_6, 2.h	1415,81	63	57,1	0,91	196,5	155,7	0,22
Ø Nachtarbeit	1580	64,8	59,8	0,916	204,4	161,7	0,21

Tabelle 5: Ventilationsvolumen ($\dot{V}_{ex}$), Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}_{O_2}$), Kohlendioxydabgabe ($\dot{V}_{CO_2}$), Respiratorischer Quotient (RQ), Arbeitsumsatz (M), Stoffwechsel ohne Arbeit (M-W) und mechanischer Wirkungsgrad (η) der einzelnen Versuchstage bei Arbeit in feucht-heißem Klima (36/30 °C).

In der letzten Reihe ist der Arbeitsumsatz aufgetragen; hier ist gegenüber den Ruhebedingungen die gleiche ca. vierfache Steigerung zu beobachten. Die Tag-Nacht-Differenz von 20 W/m^2 ist durch die nächtlich geringere Sauerstoffaufnahme verursacht. Dieser Unterschied würde bei alleiniger Berücksichtigung der O_2-Aufnahme um ca. 7 W/m^2 höher ausfallen. Die nächtliche Verringerung des Umsatzes bei anzunehmender gleicher externer Arbeit von 43,6 W/m^2 zeigt eine Verbesserung des mechanischen Wirkungsgrades η von 0,195 auf 0,21 an. Die Ursachen dafür mögen in der beschriebenen nächtlich geringeren thermischen Gesamtkonstellation der VP zu suchen sein, da der Grundumsatz bei den Rhythmikversuchen nur sehr geringfügig zwischen 52,2 und 51,7 W/m^2 schwankt. Eine genaue Obersicht der gemessenen Stoffwechselgrößen gibt *Tabelle* 5.

D. Strahlung, Konvektion und Speicherung

In der *Abbildung 10* sind neben der graphischen Verdeutlichung der Arbeit (erste Zeile) die Wärmespeicherung, die Atemwegsverdunstung, sowie der Strahlungs- und Konvektionswärmestrom in ihren Tag- und Nachtverläufen zu sehen.

Die Speicherung in der zweiten Zeile, die sich nach (18) als eine Stundendifferenzgröße aus t_{re} und $\bar{t}_s$ errechnet und als zeitliche Ableitung zu verstehen ist, spiegelt die Fluktuationen des Körperwärmebestandes wider. Sie steigt von neg. Anfangswerten um 10 W/m^2 durch die plötzliche Wärmeproduktion mit Anstieg aller Temperaturen um ca. 45 W/m^2 auf 35 W/m^2 an, die in der folgenden Arbeitszeit erhalten bleibt. Dann fällt S wieder auf "normale" Werte zurück, da sich in der Zwischenzeit mit Zunahme der Schweißproduktion eine neues höheres thermisches Gleichgewicht eingestellt hat, das einen weiteren Temperaturanstieg verhindert. Bei Arbeitsende kommt es durch die überschießende Kühlung zu einer entsprechenden Wärmeentspeicherung von ca. 30 W/m^2, sodaß annähernd wieder der normale Wärmebestand des Körpers vor der Arbeit erreicht wird. Dieser Vorgang ist naturgemäß bei Tag- und Nachtarbeit identisch, nur ist der initiale Anstieg von S in der Nacht

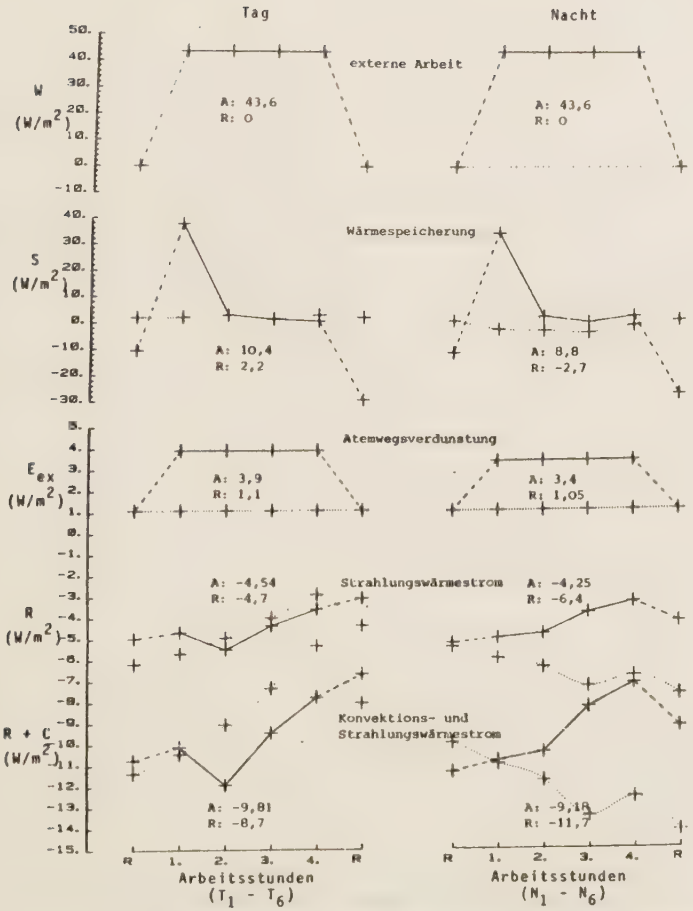

Abbildung 10: Die Arbeitsbelastung und der Verlauf von Wärmespeicherung, Atemwegsverdunstung, Strahlungs- und Konvektionswärmestrom bei Tag- (T_1- T_6) und Nachtarbeit (N_1- N_6) in feucht-heißem Klima (durchgezogene Linien). R = Werte vor und nach Arbeit (gestrichelte Linien). Gepunktete Linien als Vergleichswerte der Rhythmikversuche R_1- R_3.

durch die geringere Kerntemperatur niedriger (33,2 statt 37,5 W/m^2), wodurch sich die mittlere 4 h Wärmespeicherung von 10,4 auf 8,8 W/m^2 verringert.

Die Atemwegsverdunstung in der dritten Zeile ist infolge der gesteigerten Ventilation um ungefähr das 3-fache auf 3,9 (Tag) bzw. 3,4 W/m^2 (Nacht) angestiegen. Dieser Betrag ist jedoch im Vergleich zu den anderen noch zu besprechenden Verdunstungsgrößen gering; er beträgt weniger als 1%. Der Tag-Nacht-Unterschied wird durch den nächtlich geringeren Stoffwechsel verursacht. Nichtsdestoweniger ist die Wärmeabgabe über die Atemwege von gleicher Größenordnung wie die Zufuhr an Strahlungs- oder Konvektionswärme bei diesem Klima.

Der Strahlungs- und Konvektionswärmestrom sind in der vierten und fünften Zeile angeführt. Beide bewegen sich in einem Bereich von 4-5 W/m^2 und lassen bei Arbeit - wie schon aufgrund des Verlaufs von $\bar{t}_s$ zu vermuten war - keine Tages- und Nachtunterschiede erkennen. Beide sind als zusätzlich externe Belastung durch das Klima zu verstehen, die durch einzig verbleibenden Wärmeabfuhrweg durch Verdunstung kompensiert werden müssen.

E. Evaporation

Der Verlauf der bei feucht-heißem Klima entscheidenden Verdunstungsgrößen ist in *Abbildung 11* aufgeführt. Die darin aufgeführten Verdunstungswärmeströme sind auf drei verschiedenen Wegen ermittelbar. Sie zeigen alle unterschiedliche Größe und Verlauf.

Aus der Wärmebilanz (1) sollte E_s bei den geringeren Beträgen der anderen Wärmeströme der Wärmeproduktion minus externer Arbeit und Atemwegsverdunstung ($M - W - E_{ex}$) entsprechen, da im Durchschnitt die Wärmezufuhr durch Strahlung und Konvektion durch die Speicherung kompensiert wird. $E_s(1)$ zeigt aufgrund der anfänglichen hohen Wärmespeicherung in der 1. h den niedrigsten Wert, steigt in der 2. h auf ein Maximum, das mit 186 W/m^2 leicht oberhalb der nicht eingezeichneten Differenz M - W (180 W/m^2) liegt und sich dann annähernd auf diesem Niveau stabilisiert. Nachts liegt $E_s(1)$

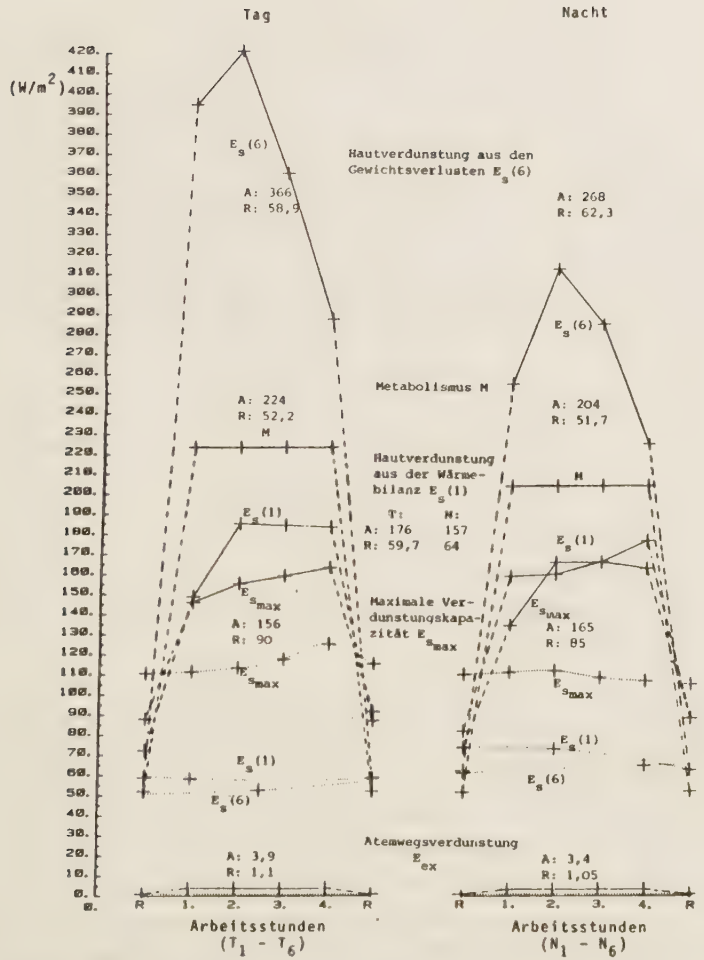

Abbildung 11: Der Verlauf von Hautverdunstung aus Gewichtsverlusten $E_s(6)$, Metabolismus M, Hautverdunstung aus der Wärmebilanz $E_s(1)$, maximaler Verdunstungskapazität E_{Smax} und Atemwegsverdunstung E_{ex} bei Tag- (T_1- T_6) und Nachtarbeit (N_1- N_6) in feucht-heißem Klima (durchgezogene Linien). R = Werte vor und nach Arbeit (gestrichelte Linien). Gepunktete Linien als Vergleichswerte der Rhythmikversuche R_1- R_3.

bei geringerem Stoffwechsel entsprechend niedriger, zeigt aber den gleichen Verlauf. Die Tag- und Nacht-4-h-Mittelwerte liegen bei 176 bzw. 157 W/m^2.

Die maximale Verdunstungskapazität, die sich aus der Wasserdampfdruckdifferenz von Haut und Umgebung nach (5) berechnet, zeigt im Vergleich zu $E_s(1)$ bei Tagarbeit um 20 W/m^2 zu niedrige Werte. Der Grund dafür dürfte in der unzureichenden Bestimmung der mittleren Hauttemperatur zu suchen sein, bei der die Phalangentemperaturen nicht berücksichtigt werden konnten. Bei günstigeren Verdunstungsbedingungen der Phalangen durch größeren Oberfläche/Volumen Quotienten und tagsüber erhöhtem Vasokonstriktorentonus dürften die lokalen Temperaturen dort niedriger und somit $\bar{t}_s$ zu hoch ausfallen. Bei Nachtarbeit ist die Situation umgekehrt, E_{Smax} ist um 8 W/m^2 größer als $E_s(1)$. Auch hier dürfte der Fehler vor allem in der ungenauen Bestimmung von $\bar{t}_s$ zu suchen sein, welche unter Berücksichtigung des zum Kern umgekehrten Tagesganges der Phalangen als zu niedrig ermittelt sein dürfte. Der Bereich der Fehlbestimmung läßt sich nach (5) und (21) abschätzen: Eine Änderung von 0,4 °C bei $\bar{t}_s$ entspricht 0,77 mm Hg Wasserdampfdruckänderung der Haut und damit einem Betrag von 10 W/m^2 von E_{Smax}.

Der letzte Weg zur Ermittlung der Verdunstungswärme geht nach (6) über die Verdunstungsenthalpie des Wassers. Hierbei wurde zur Bestimmung vom ermittelten Gewichtsverlust pro h erst der trockene und feuchte Anteil des Verlustes über die Atemwege abgezogen. Letztere betrugen im Mittel 33 g/h am Tage ($\dot{m}_d$= 12 g/h und $\dot{m}_w$= 21 g/h) und 42 g/h bei Nacht ($\dot{m}_d$= 24 g/h und $\dot{m}_w$= 18 g/h). Die Verluste lagen damit in einem Bereich von 3-4 % der Gesamtverluste und beeinflussten den charakteristischen Verlauf von $E_s(6)$ nicht. Diese auch als Schweißverdunstungskapazität bezeichnete Größe liegt mit 366 W/m^2 tagsüber doppelt so hoch wie die zur ausgeglichenen Bilanz nötige Verdunstung $E_s(1)$. Das Verhältnis von $E_s(6)$ zu $E_s(1)$ spiegelt die schon von *Höfler et al.* (1969) näher beschriebene Tatsache wider, daß eine mindest zweifach so große Schweißmenge nötig ist, um eine vollständige Wasser-

bedeckung der Haut als Vorrausetzung einer maximalen Verdunstung zu erhalten. Es ist bemerkenswert, daß $E_s(6)$ aufgrund der nächtlich geringeren Schweißproduktion auf 268 W/m^2 absinkt, sodaß sich das Verhältnis von $E_s(6)/E_s(1)$ von 2,1 : 1 am Tage auf 1,7 : 1 bei Nacht verringert. Die sich aus der Abnahme der Schweißmenge ergebende Verringerung der Verdunstung über die Haut ist mit 98 W/m^2 fast fünffach so groß wie der Rückgang des Stoffwechsels. Es scheint, als ob die VP durch die nächtlich günstigeren Kern- und Schalentemperaturen auch bei geringerer Benetzung der Haut zu einer thermischen Balance kommen kann. Die genauen Zahlenwerte der einzelnen Bilanzgrößen sind in der *Tabelle 6* aufgeführt.

	Tag (T_1 - T_6)							Nacht (N_1 - N_6)							Differenz
	R	1.h	2.h	3.h	4.h	R	$\bar{x}_T$	R	1.h	2.h	3.h	4.h	R	$\bar{x}_N$	$\bar{x}_T - \bar{x}_N$
M	52,2	224	224	224	224	52,2	224	51,7	204	204	204	204	51,7	204	20
M-W	52,2	180,4	180,4	180,4	180,4	52,2	180,4	51,7	160,4	160,4	160,4	160,4	51,7	160,4	20
R	-4,97	-4,7	-5,5	-4,4	-3,6	-3,1	-4,6	-5,2	-5,0	-4,8	-3,8	-3,3	-4,3	-4,3	-0,3
C	-5,8	-5,4	-6,4	-5,1	-4,2	-3,6	-5,3	-6,1	-5,8	-5,6	-4,5	-3,9	-5,0	-4,9	-0,4
S	-10,6	37,5	2,9	1,1	0,4	-29,6	10,4	-12,0	33,2	1,4	-0,7	1,4	-28,2	8,8	1,6
E_{ex}	1,1	3,9	3,9	3,9	3,9	1,1	3,9	1,05	3,4	3,4	3,4	3,4	1,05	3,4	0,5
$E_s(1)$	72,4	149,1	185,5	184,8	183,9	87,4	176	73,9	134,6	166	166	162,8	88,1	157	19
$E_s(6)$	58,9	394,8	421,3	360,5	287,5	58,9	366	62,3	254,3	311,3	283,4	224,1	62,3	268	98
E_{Smax}	88	146,3	155,6	159,5	163,7	92	156	82	159,1	160	166,2	176,6	88	165	-9

Tabelle 6: Gegenüberstellung der gemessenen und errechneten Stundenwerte der einzelnen Wärmebilanzgrößen M, M-W, R, C, S, E_{ex}, $E_s(1)$, $E_s(6)$ und E_{Smax} bei Tag- (T_1- T_6) und Nachtarbeit (N_1- N_6). R = Werte vor und nach Arbeitsbelastung. $\bar{x}_T$ und $\bar{x}_N$ = 4h-Mittelwerte der Tag- bzw. Nachtarbeit. $\bar{x}_T - \bar{x}_N$ = Tag-Nacht-Differenz.

IV) Diskussion

a) Die Temperaturverläufe in feucht-heißem Klima

Die ermittelte Rektaltemperatur entspricht in Höhe und Verlauf weitgehend den in der Literatur (*Menzel*, 1962; *Conroy*, 1970) gegebenen Beschreibungen. Allerdings ist ihre Schwingungsweite mit 0,48 °C (36,84 - 37,32 °C) gegenüber der normalen Umgebungstemperatur eingeschränkt. So geben *Hensel et al.* (1973) eine Schwankungsbreite von 1,49 °C (36,83 - 38,32 °C) für ein Kollektiv junger Männer unter Standardbedingungen an. Aufgrund des Verlaufes von t_{re} mit einem Bigeminus von zwei Tagesmaxima kann man nach *Östberg* (1976) eine genauere Typologie der circadianen Phasenlage versuchen, wobei der Autor einen Morgentyp mit einem geringen oder gar keinem Abfall zwischen dem 1. und dem 2. Tagesmaximum von einem Abendtyp mit einem niedrigen, wenig ausgeprägten 1. Tagesmaximum unterscheidet. Die VP liegt mit ihren zwei ausgeprägten Maxima (37,28 und 37,32 °C bei 15 und 21 Uhr) allerdings als Indifferenztyp dazwischen.

Auch die Hauttemperaturen zeigen den zu erwartenden Verlauf mit körperkern-synchroner Phasenbeziehung von Kopf und Körperstamm, einem Indifferenzbereich an Hand und Unterschenkel und schließlich einer Phasenumkehr der weiter distal gelegenen Partien. Hier liegt die größte Schwingungsweite an Arm und Oberschenkel; dieses dürfte jedoch ein Artefakt durch den Klimawechsel der VP zu Versuchsbeginn mit einem hohen Wärmestau um 14 Uhr sein, so daß die eigentlich höchste Schwingung wie bei den Vorversuchen in der Peripherie liegen dürfte. Allerdings ist sie dort auf einen Bereich von ca. 1 °C eingeschränkt.

Der Gegensatz von körpernahen und -fernen Hauttemperaturen verdeutlicht zugleich die Schwierigkeit der genauen Bestimmung der mittleren Hauttemperatur. $\bar{t}_s$ bleibt als gewichtete Summe verschiedener Hautareale eine problematische Größe, wenngleich sie für Bilanzbetrachtungen unerläßlich erscheint. Die hier gewählte Gewichtung ist schon 1935 so von *Pfleiderer und Büttner* vorgeschlagen worden, während im anglo-amerikanischen Schrifttum meistens andere Meßorte und Gewichtungen

benutzt werden. Die gebräuchlichste Bestimmung ist ein 1938 von *Hardy and Du Bois* beschriebenes 7-Punktesystem mit folgenden Stellen und Gewichtungen: Stirn 0,07, Brust 0,35, Oberschenkel 0,19, Wade 0,13, Fußsohle 0,07, Unterarm 0,14 und Handinnenfläche 0,05. Dieses System ist danach oft modifiziert und zu einem 10-Punktesystem ausgebaut worden (Näheres s. *Teichner*, 1958; *Ramanathan*, 1964; *Nadel*, 1971). Wendet man die dort vorgeschlagenen Gewichtungen auf die bei den Rhythversuchen bei 36/30 °C gemessenen entsprechenden sieben Hautstellen an, so ergibt sich nur eine geringfügige Differenz von 0,04 °C füt $\bar{t}_s$ (31,81 statt bisher 31,85 °C).

Bisher ist jedoch noch keine Modifikation beschrieben worden, die die Tagesperiodik bei der Ermittlung der mittleren Hauttemperatur berücksichtigt. Obwohl den einzelnen peripheren Hautarealen durch die Phasenverschiebung von Kern und Schale im Verlauf des Tagesganges bei Tage eine andere Gewichtung zukommen dürfte als bei Nacht. Des weiteren dürfte auch das umgebende Klima die Gewichtung der einzelnen Hautareale verschieben. So hat *Heise* (1968) erstmalig das Schwingungsverhalten von Haut- und Kerntemperatur bei vier verschiedenen Raumtemperaturen (20, 24, 28 und 32 °C, RF von 40-50%) näher untersucht. Er kommt zu dem Ergebnis, daß Haut- und Rektaltemperatur in Schwingungsweite, Mittelwert und Phasenlage von der Umgebungstemperatur abhängen. t_{re} hat eine maximale Amplitude bei 24 °C und eine minimale bei 32 °C, ebenso nimmt $\bar{t}_s$ bei steigender Umgebungstemperatur in seiner Schwingungsweite linear ab (Näheres s. *Aschoff et al.*,1974). Aus den vorliegenden Ergebnissen sei deshalb ein kurzer Vergleich der Ergebnisse der Vorversuche bei 31/20 °C mit den 36/30 °C Klimaversuchen angeführt.

b) Die Unterschiede zwischen 31/20 °C und 36/30 °C Trocken- bzw. Feuchttemperatur

In *Tabelle 7* sind die verschiedenen gemessenen und errechneten Größen bei beiden Klimabedingungen und ihre Änderungen und Schwingungsweiten zusammengestellt. Es zeigt sich, daß es mit dem Obergang in eine feucht-heiße Umgebung durch die Anhebung der Umgebungstemperatur in die Höhe des Körperkerns und durch

	Klima 31/20°C	Klima 36/30°C	Differenz 36/30-31/20°C
	a) Temperaturen in °C		
t_{d}^{a}	31,32 *0,8*	36,02 *0,18*	4,7
t_{d}^{wb}	19,65 *2,3*	30,28 *0,59*	10,63
t_{d}^{re}	36,71 *0,57*	37,09 *0,48*	0,38
t_{d}^{fu}	32,77 *2,6*	34,96 *0,88*	2,19
	b) Puls und Atmung pro min.		
Puls d	56 *10*	61 *13*	5
Atmung d	18 *3*	18 *6*	0
	c) Gewichtsverlust in g/h		
$\dot{m}_b$	84	173	89
	d) Bilanzgrößen in W/m^2		
M	44	52	8
R+C	13	-10	23
$E_s(6)$	27	61	34

Tabelle 7: Vergleich der 24 h Mittelwerte und Schwingungsweiten d von t_a, t_{wb}, t_{re}, t_{fu}, Puls und Atmung sowie der Durchschnittswerte von $\dot{m}_b$, M, R+C und $E_s(6)$ bei zwei verschiedenen Klimabedingungen (31/20 und 36/30 °C). R+C aus t_{fu}-t_a errechnet. Nähere Erläuterung im Text.

die Verdoppelung der Luftfeuchte von 33 auf 66% zu einer eindrucksvollen Änderung der Körpertemperaturen kommt. So steigt die Rektaltemperatur um fast 0,4 °C an, und die Füße erfahren eine durchschnittliche Aufheizung von über 2 °C. Ähnlich dürfte die Änderung auch im Bereich der Hände sein. Ferner zeigt sich, daß auch die Schwankungsbreite der Körpertemperaturen durch die vergrößerte Wärmelast verringert wird. Diese Änderungen spiegeln die schon eingangs erwähnte Tatsache wider, daß die Körperschale als der variable Teil der Anpassung des gleichwarmen Körperkerns an die Umgebung anzusehen ist, die umgekehrt in kalten Klimaten auch eine entsprechende Abkühlung erfahren kann (*Burton and Edholm*, 1955).

Als wesentliche Ursache für die höhere Wärmeaufladung und verminderte Schwingungsbreite kommt die bei höheren Umgebungstemperaturen aufgehobene Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung in Betracht, da sie direkt von der Differenz von Haut- und Umgebungstemperatur abhängt. Beträgt die Differenz ($t_{fu} - t_a$) unter Behaglichkeitsbedingungen noch ca. 1,5 °C, so ist sie in feucht-heißem Klima auf -1 °C abgesunken. Es kommt statt einer Wärmeabfuhr zu einer Zufuhr , die von der VP anderweitig kompensiert werden muß. Nimmt man zur Oberschlagsrechnung t_{fu} als $\bar{t}_s$ an, so läßt sich nach (17) berechnen, daß aus einer mittleren Wärmeabgabe von R und C von 13 W/m^2 eine Zufuhr von 10 W/m^2 geworden ist. Diese Belastung macht sich auch in einem Anstieg der Pulsfrequenz von 56 auf 61 Schläge pro min. bemerkbar. Durch die Steigerung der peripheren Durchblutung wird eine höhere evaporative Wärmeabgabe möglich, die die Belastung durch Strahlung und Konvektion kompensieren kann. Und so steigt der mittlere Gewichtsverlust $\dot{m}_b$ von 84 auf 173 g/h an. Nimmt man noch als Mittelwert für den Stoffwechsel unter Behaglichkeitsbedingungen einen Ruheumsatz von 44 W/m^2 an, so läßt sich die Änderung in der Wärmebilanz bei der vorliegenden Klimaänderung gut abschätzen: Die Änderung des Strahlungs- und Konvektionswärmestroms von 23 W/m^2 mit einer Nettozufuhr von ca. 10 W/m^2 in feucht-heißem Klima führt durch verstärkte Kreislaufarbeit zu einem Anstieg des Stoffwechsels um ca. 8 W/m^2, die jetzt zusammen allein

durch den erhöhten Verdunstungswärmestrom kompensiert werden können. Tatsächlich ergibt $E_s(6)$ mit 61 W/m^2 fast genau den Betrag, der zu einer ausgeglichenen Bilanz bei einem Stoffwechsel von 52 W/m^2 und einer zusätzlichen Wärmezufuhr durch Strahlung und Konvektion von 10 W/m^2 nötig ist.

c) Die Tagesperiodik von Wärmebilanz und Schweißabgabe

Bei der Wärmebilanz als der Summe von Wärmebildung und -abgabe hat *Aschoff* (1967 b) festgestellt, daß zumindest für die Wärmeabgabe ein Tagesgang existiert. Er bestimmte dazu den Wärmedurchgang durch die Körperschale bei Umgebungstemperaturen unterhalb des Behaglichkeitsbereichs, indem er den Ruheumsatz durch das Temperaturgefälle (Kern - Haut) dividierte. Er kam dabei zu dem Schluß, daß die minimale Wärmedurchgangszahl nachts höher liegt als am Tage, da der Vasomotorentonus tagsüber einen höheren Maximalwert mit stärkerer Konstriktion hat und so eine stärkeres Temperaturgefälle am Tage ermöglicht.

Diese Oberlegung gilt prizipiell auch für die vorliegenden Versuche: Das Temperaturgefälle Kern - Peripherie ($t_{re} - t_a$) ist zu den Zeiten des Maximums und Minimums von t_{re} (21 und 4 Uhr) am Tage mit 2,42 °C (37,32 - 34,9) höher als in der Nacht mit 2,24 °C (36,84 - 34,53). Nur ergibt sich daraus - wie schon erwähnt - bei dieser Klimakonstellation mit Umgebungstemperaturen oberhalb der Hauttemperatur eine Wärmezufuhr durch Strahlung und Konvektion, die nachts bei durchschnittlich niedrigerer Hauttemperatur höher ist als am Tage und so durch stärkere evaporative Wärmeabgabe kompensiert werden muß. Und so wundert es nicht, daß $\dot{m}_b$ nachts um ca. 10 g/h größer ist als am Tage.

Schwieriger ist die Frage einer Tagesperiodik der Wärmebildung. Aus den vorliegenden Versuchen läßt sich aufgrund der Meßungenauigkeiten kein Tag-Nacht-Unterschied sichern. Aber auch in der Literatur liegen dazu keine einheitlichen Angaben vor. Die Mehrzahl der Autoren gibt - wie schon einleitend erwähnt wurde - ein nächtliches Minimum bei thermisch indifferenten Bedingungen an. Bei 30 °C Umgebunstemperatur stellt jedoch *Koe* (1963) bei unbekleideten Personen keine Tagesrhythmik fest. *Schmidt* findet dagegen bei 28 °C einen

Tagesgang von Wärmebildung und -abgabe mit einer signifikanten Phasendifferenz von 1,2 h. Er folgert: "Diese Phasenwinkeldifferenz ist die Ursache für den Tagesgang der Körpertemperaturen, an dem die Wärmebildung und -abgabe in ungefähr gleichem Maße beteiligt sind" (*Schmidt*, p 49, 1972). Er schließt jedoch nicht aus, daß die Beteiligung beider Komponenten bei anderen Umgebungstemperaturen in Amplitude und Phasenlage anders sein könnte. Insgesamt gesehen erscheint es wichtig, immer die spezielle thermische Gesamtsituation des Organismus und seine besonderen Reaktionsmöglichkeiten im Auge zu behalten statt einfache Feststellungen über das Verhalten einzelner Wärmebilanzgrößen abzugeben. So kann man bei den Liegeversuchen bei 36/30 °C aufgrund der nächtlich höheren Wärmelast durch Strahlung und Konvektion zu dem Schluß kommen, daß durch die verstärkte evaporative Schweißabgabe bei Nacht der Stoffwechsel etwas höher liegen dürfte. Die anschließend durchgeführten Arbeitsversuche mit ihrer nun zusätzlich gesteigerten externen Wärmelast ergeben aber dann wieder das genaue Gegenteil, eine deutliche Abnahme des Stoffwechsels bei Nacht.

Für die Frage einer Tagesperiodik der Schweißproduktion gelten ähnliche Überlegungen. Unter Ruhebedingungen scheint die Schweißabgabe bei feucht-heißem Klima nachts höher zu liegen. Eine Beobachtung, die schon *Fox et al.* (1967) anläßlich einer Erprobung eines neuen Hyperthermietests machten. Sie finden, daß am Nachmittag bei höheren Kerntemperaturen der Schweißausbruch später beginnt als am Vormittag. *Crockford et al.* (1970) gehen dieser Beobachtung nach und beschreiben eine circadiane Variation der Schweißschwelle bei zwei VP mit standardisierter Diät und Aktivität. Die Schweißschwelle ist morgens (7 Uhr) bei 36,45 °C Kerntemperatur am niedrigsten und hat ihren höchsten Wert abends (20 Uhr) bei 37,3 °C. Ähnliches stellen *Timbal et al.* (1975) fest, die ruhende VP um 2, 10 und 18 Uhr einem trockenen, heißen Klima aussetzen. Sie bemerken, daß die Latenzperiode des Schweißbeginns sich in der Nacht vermindert und sich im Verlauf des Tages wieder erhöht. Sie beziehen die Schweißschwelle auf die mittlere Körpertemperatur und postulieren, daß die Schweißproduktion ab einem bestimmten fixen Wert der peripheren Vasodilatation beginnt. Die Schweißabgabe kön-

ne demzufolge bei nächtlich endogen höherem Dilatationszustand durch Wärme eher provoziert werden als am Tage. Ihrer weiteren Folgerung daraus, daß deshalb der Sicherheitsbereich für Hitzebelastung am Tage größer als in der Nacht sei, kann aufgrund der eigenen Ergebnisse bei den Arbeitsversuchen jedoch nicht entsprochen werden. Ist es doch trotz wahrscheinlich nächtlich niedrigerer Schweißschwelle dort so, daß die Gesamtschweißmenge drastisch niedriger liegt und auch die Pulsfrequenz den Eindruck erweckt, daß Hitzebelastung von der rein physiologischen Bilanzbetrachtung aus nachts besser tolerabel ist als am Tage. Den Zusammenhang von Vasodilatation und Schweißabgabe haben *Wenger et al.* (1976) deshalb näher anhand von Arbeitsversuchen bei neutralen Temperaturen (25 °C) untersucht. Sie finden eine Senkung der nächtlichen Schwelle sowohl für die Vasodilatation als auch für die Schweißabgabe und meinen, daß eine gemeinsame vasomotorische und sudomotorische Kontrolle vorliegt, die den größten Teil der Tagesschwankungen der inneren Körpertemperatur hervorrufen. Der durch die stärkere Vasodilatation mögliche höhere innere Wärmestrom bei Nacht und die früher beginnende Schweißsekretion wären danach die beiden Mechanismen, die die nächtlich günstigere Wärmebilanz bei den vorliegenden Arbeitsversuchen mitbegründen und auch den scheinbaren Widerspruch erklären, daß trotz niedrigerer Schweißschwelle mit höherer Schweißabgabe bei den Ruheversuchen bei Nacht, während der Arbeitsversuche eine nächtlich verminderte Schweißmenge auftritt.

d) Tag- und Nachtarbeit in feucht-heißem Klima

Bei den Arbeitsversuchen kommt es durch die zusätzliche externe Wärmelast zu einem starken Anstieg der stündlichen Schweißrate, die im Durchschnitt 1015 g/h (4060 g/4h) am Tage beträgt. Sie liegt damit höher als von anderen Autoren beschriebene Werte. So findet *Laaser* (1968) bei gleichen Klimabedingungen und einer allerdings nur 40-minütigen Arbeitsbelastung nach dreiwöchiger Akklimatisation eine mittlere integrale Schweißmenge von 780 g/h (3125 ml/4h), während *Balg* (1970) in einer Zusammenstellung bei 50-minütiger Arbeit einen Wert von 850g/h

(1954 kcal/4h) angibt. Die im Anglo-amerikanischen manchmal gebräuchliche vorhersagbare 4h-Schweißrate (predicted 4-hrs sweat rate = P4SR) nach *McArdle et al.* (1947) liegt mit 2550 ml/4h noch bedeutend niedriger. Diese zuletzt genannte Diskrepanz ist schon von *van Ackeren* (1972) näher analysiert worden, der dabei zu dem Schluß kam, daß *McArdle* nicht die unverdunstet abtropfende Schweißmenge berücksichtigt, die jedoch nötig ist, um eine vollständige Oberflächenbedeckung der Haut zu erreichen. Für die Unterschiede zu den von den anderen beiden Autoren unter gleichen Bedingungen gemessenen Schweißraten läßt sich nur vermuten, daß die hier vorliegende höhere Schweißmenge Folge einer noch nicht ganz abgeschlossenen Akklimatisation mit noch nicht ganz vollzogener regionaler Umverteilung der Schweißproduktion sein könnte. Dafür spricht auch, daß das Maximum der Schweißabgabe noch relativ früh in der 2. Stunde liegt.

Die in der Nachtzeit gemessenen Schweißraten liegen mit ihren Durchschnittswerten von 760 g/h (3040 g/4h) bemerkenswert niedrig. Zwar haben schon *Timbal et al.* (1975) bemerkt, daß bei konstanter externer Hitzelast auch tagesperiodische Unterschiede in der Schweißrate auftreten. Sie finden nämlich abends eine um 7% höhere Schweißrate als morgens, die sich jedoch nicht mit ihren Hypothesen verträgt, und die sie experimentellen Fehlern zuschreiben. Genauer untersucht *Westin* (1976) erstmalig die circadiane Variation der Schweißrate bei schwerer Arbeit in feucht-heißem Klima bei einem Kollektiv junger Männer nach dreiwöchiger Hitzeakklimatisation bei einer 2-3 h Arbeitsbelastung mit 60% der maximalen Sauerstoffaufnahmekapazität. Auch bei ihm beträgt die Umgebungstemperatur 36 ^{o}C und die Luftfeuchte ca. 70%. Er stellt fest, daß die nächtliche Schweißproduktion mit 1307 ml/h (SD 164 ml) um ca. 6% niedriger liegt als am Tage mit 1392 ml/h (SD 165 ml). Im Unterschied zu den hier beschriebenen Versuchen legte er jedoch die Arbeitszeit in die Extrema der zuvor ermittelten Rektaltemperatur. Sein Tagesmaximum (Acrophase) lag bei 14^{4o} Uhr $\pm$ 3h und sein Minimum (Bathophase) bei 4 Uhr $\pm$ 2,5h. Da er auch keine feste externe Arbeit vorgab, lassen sich keine Bilanzbetrachtungen anstellen; sicher ist jedoch, daß die Arbeitsbelastung höher

lag und so die höhere Schweißrate erklärlich ist. Daß die Tag-Nacht-Unterschiede in den hier vorliegenden Versuchen mit ca. 25% bedeutend höher liegen, mag seine Ursache darin haben, daß sie nicht zu Zeiten der Extrema der Kerntemperatur, sondern in dem Zeitraum der stärksten gerichteten Temperaturänderungen stattgefunden haben. Muß man doch davon ausgehen, daß die Kerntemperatur als tagesperiodische Regelgröße sich mit einer Phasenwinkeldifferenz von 30 - 60° verzögert gegenüber den vaso- und sudomotorischen Stellgliedern einstellt. So überschreitet beispielsweise die Fuß- und Zehentemperatur ihren Mittelwert zwischen 21 und 22 Uhr, während die Rektaltemperatur erst um 0^{10} Uhr unter ihren Mittelwert abfällt. Ähnlich verhält es sich mit den Extrema von Kern und Peripherie, hier liegt aufgrund der Kurvenasymmetrie keine einheitlich anzunehmende Phasenumkehr vor, sondern das Minimum von t_{fu} und t_{ze} liegt 3h vor dem Hauptmaximum von t_{re}.

e) Kerntemperatur, Schweißproduktion und Verdunstung

Wie schon Im Verlauf der Akklimatisation (s. Abb. 6) zu sehen war, ist die Zunahme der stündlichen Schweißproduktion der entscheidende Vorgang. Die erhöhte Schweißmenge führt zu einer größeren Verdunstung durch vollständigere Benetzung der Hautoberfläche. Dadurch ist der Anstieg der Hauttemperaturen im Verlauf der Arbeitszeit geringer und die Rektaltemperatur kann sich auf einem geringeren Niveau stabilisieren; die Hyperthermiegefährdung ist vermindert. *Höfler et al.* (1969) stellten fest, daß im akklimatisierten Zustand die Schweißmenge mehr als doppelt so hoch wie die Verdunstungskapazität ist.

Trägt man zum Vergleich der verschiedenen physiologischen Zustände vor und nach Akklimatisation sowie bei Tag- und Nachtarbeit, die einzelnen Verdunstungsgrößen gegen die Kerntemperatur auf, wie es in *Abbildung 12* anhand der mittleren aufsummierten Stundenwerte der 1., 3. und 4. Woche geschehen ist, so ergibt sich für die Akklimatisation ein ganz ähnliches Bild. Alle Verdunstungsgrößen verschieben sich im Verlauf der Akklimatisation zu niedrigeren Kerntemperaturen. t_{re} fällt von durchschnittlich 38,55 auf 38,27 °C, zugleich nimmt die Schweißmen-

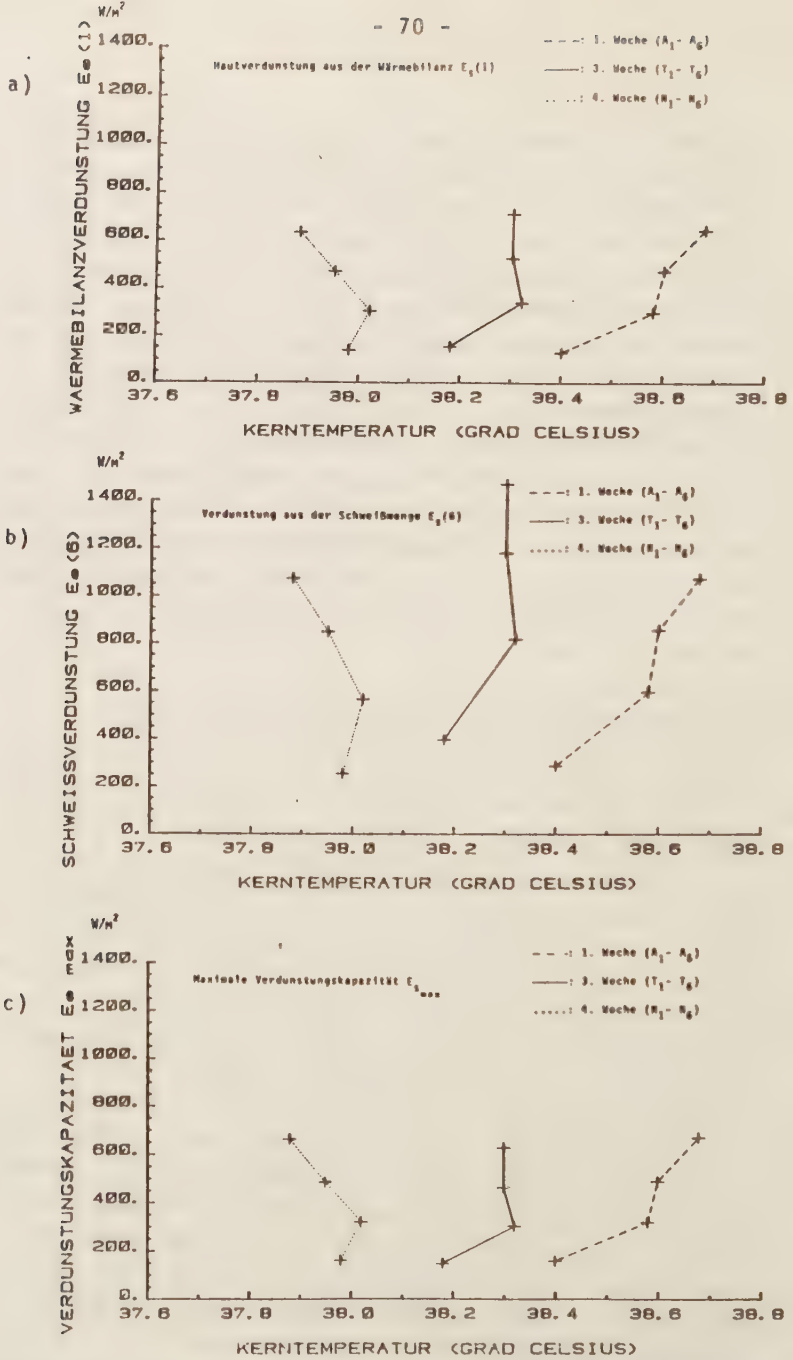

Abbildung 12: Der Verlauf der aufsummierten mittleren Stundenwerte von a) $E_s(1)$, b) $E_s(6)$ und c) E_{Smax} gegen die Kerntemperatur t_{re} bei Tagarbeit in der 1. und 3. Woche sowie bei Nachtarbeit (4. Woche). Nähere Erläuterungen im Text.

ge zu. Sie steigt innerhalb von 4 h auf 1464 W/m^2, während sie zuvor 1066 W/m^2 betragen hatte. Dadurch ändert sich das Verhältnis von $E_s(6)$ zu $E_s(1)$ von 1,7:1 auf 2,1:1. Gleiches gilt für das Verhältnis von $E_s(6)$ zu E_{Smax}, da $E_s(1)$ und E_{Smax} in Verlauf und Betrag bei allen Versuchen gut übereinstimmen.

Ganz anders ist jedoch die Änderung zwischen Tag- und Nachtarbeit. Zwar fällt die Kerntemperatur nochmals um 0,31 °C bei Nacht ab, aber zugleich zeigt die Schweißmenge einen Rückgang auf Werte wie sie vor der Akklimatisation in der ersten Woche bestanden haben. $E_s(6)$ erreicht mit durchschnittlich 268 W/m^2 fast genau den ursprünglichen Wert von 275 W/m^2. Ähnlich verhält es sich mit $E_s(1)$ (157 W/m^2 in der 4. Woche, 159 W/m^2 in der 1. Woche) und E_{Smax} (165 statt 166 W/m^2). Das bedeutet, daß die endogene nächtliche Umstellung mit einer Erleichterung des inneren Wärmestroms, die zuvor erreichte hohe Schweißproduktion überflüssig gemacht hat. Das Verhältnis von $E_s(6)$ zu $E_s(1)$ sinkt demzufolge wieder auf 1,6:1 ab. Reicht am Tage die hohe Schweißproduktion gerade noch aus, einen Anstieg von t_{re} im Verlauf der Arbeit zu kompensieren, so setzt sich bei Nacht trotz gleicher Belastung die Vasodilatation mit einem Abfall der Kerntemperatur noch durch. Wie weit dies letztere in diesem Ausmaß jedoch von der erreichten Akklimatisation mit abhängt, läßt sich nicht entscheiden, da keine unakklimatisierten Nachtversuche vorliegen. Es ist nicht auszuschließen, daß die nächtlich niedrigere Schweißschwelle zusammen mit einer initial stärkeren Schweißabgabe, eine anfänglich höhere Wärmeaufladung verhindert und so den Organismus in einem günstigeren Regelbereich hält, der eine höhere Schweißabgabe unnötig macht.

V) Zusammenfassung

1. Es wurde der tagesperiodische Verlauf der verschiedenen Wärmebilanzgrößen und insbesondere die Schweißproduktion einer Versuchsperson in feucht-heißem Klima bei 36 °C Trocken- und 30 °C Feuchttemperatur in Ruhe und bei Arbeitsbelastung von 78,5 Watt (8 mkp/s) näher untersucht.
2. Es zeigt sich, daß die Rektaltemperatur um 0,38 °C und die periphere Fußtemperatur um 2,0 °C gegenüber den Behaglichkeitsbedingungen erhöht sind, und daß die Amplitude der Tagesschwankungen in der Peripherie bis auf ein Drittel vermindert wird. Zugleich führt die Erhöhung der Umgebungstemperatur auf Werte oberhalb der Hauttemperaturen zu einer zusätzlichen Wärmezufuhr durch Strahlung und Konvektion von ca. 10 - 15 W/m^2, die durch weitere Schweißabgabe kompensiert werden muß, da die Schweißverdunstung der einzig verbleibende Weg der Wärmeabfuhr ist. Diese klimatisch bedingte Wärmezufuhr ist aufgrund der nächtlich niedrigeren Hauttemperaturen nachts höher als am Tage.
3. Bei den Tagesarbeitsversuchen kommt es im Verlauf einer dreiwöchigen Akklimatisation zu einer Erhöhung der Schweißrate um 25% und zu einer Senkung der Korntemperatur von 0,28 °C. Das Verhältnis von Schweißmenge zu Verdunstungskapzität steigt damit von 1,6:1 auf 2:1 an und ermöglicht eine vollständige Benetzung der Hautoberfläche.
4. Bei den Nachtarbeitsversuchen verringert sich der Arbeitsumsatz um 20 W/m^2 und auch die Schweißmenge fällt um 25% auf Ausgangswerte wie vor der Akklimatisation zurück. Die Korntemperatur sinkt demgegenüber um weitere 0,31 °C ab, während die verschiedenen gemessenen Hauttemperaturen fast keine Unterschiede zwischen Tag- und Nachtarbeit zeigen. Die Ursachen dieser Unterschiede werden diskutiert.

VI) Literatur

ALLEN, J.A.; RODDI, I.C.: Sweat production during catecholamine infusion in man.
J. Physiol. (London) 222, 7o P (1971).

ASCHOFF, J. und KAEMPFFER, F.: Ober den Wärmedurchgang durch die Haut und seine Änderung bei Vasokonstriktion.
Pflügers Arch. 249, 112-124 (1947 a).

ASCHOFF,J.: Einige allgemeine Gesetzmäßigkeiten physikalischer Temperaturregulation.
Pflügers Arch. 249, 125-136 (1947 b).

ASCHOFF, J.: Zur Regulationsbreite der physikalischen Temperaturregulation.
Pflügers Arch. 249, 137-147 (1947 c).

ASCHOFF. J.: Die obere Extremität im Dienste der physikalischen Temperaturregulation.
Pflügers Arch. 249, 148-166 (1947 d).

ASCHOFF, J.: Hundert Jahre "Homoiothermie".
Naturwiss. 35, 235-238 (1948).

ASCHOFF, J.: Der Tagesgang der Körpertemperatur beim Menschen.
Klin. Wschr. 33, 545-551 (1955).

ASCHOFF, J.: Hauttemperatur und Hautdurchblutung im Dienst der Temperaturregulation.
Klin. Wschr. 36, 193-202 (1958 a).

ASCHOFF, J.: Die Extremitäten als Effektoren der physikalischen Temperaturregulation.
Wien. med. Wschr. 108, 404-409 (1958 b).

ASCHOFF, J.: Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen.
Naturwiss. 45, 477-485 (1958 c).

ASCHOFF, J.; WEVER, R.: Spontanperiodik des Menschen bei Ausschluß aller Zeitgeber.
Naturwiss. 49, 337-342 (1962).

ASCHOFF, J.; GERECKE, U. und WEVER, R.: Phasenbeziehungen zwischen den circadianen Perioden der Aktivität und der Kerntemperatur beim Menschen.
Pflügers Arch. 295, 173-183 (1967 a).

ASCHOFF, J.: Die minimale Wärmedurchgangszahl des Menschen am Tage und in der Nacht.
Pflügers Arch. 295, 184-196 (1967 b).

ASCHOFF, J.: Temperaturregulation.
In: Physiologie des Menschen, Hrsg. Gauer-Kramer-Jung, Bd. 2, 43-116. München-Berlin-Wien: Urban und Schwarzenberg 1971.

ASCHOFF, J.; BIEBACH, H.; HEISE, A. and SCHMIDT, T.: Day-night variation in heat balance.
In: Heat Loss from Animals and Man, edited by J.L. Monteith and L.E. Mount, chapt. 8.
London: Butterworths 1974.

ASCHOFF, J.; POHL, H.: Phase relations between a circadian rhythm and its zeitgeber within the range of entrainment.
Naturwiss. 65, 80-84 (1978).

ASTRAND, P.O; ASTRAND, K.R.: Textbook of Work Physiology.
New York - London: McGraw-Hill 1970.

AUTENRIETH, J.H.F.: Handbuch der empirischen menschlichen Physiologie.
Tübingen 1801.

BÄRENSPRUNG, F. v.: Untersuchungen über die Temperaturverhältnisse des Foetus und des erwachsenen Menschen im gesunden und kranken Zustande.
Arch. Anat. u. Physiol. 126-175 (1851).

BALG, G.: Beziehungen zwischen Verdunstung und Schweißmenge bei Hitzearbeit.
Dissertation, Tübingen 1970

BELDING, H.S.: Resistance to heat in man and other homeothermic animals.
In: Thermobiology, edited by A.H. Rose, chapt. 13, London-New York: Academic Press 1967.

BENEDICT, F.G.: Factors affecting basal metabolism.
J. Biol. Chem. 20, 263-299 (1915).

BERGMANN, K.G.L.Chr.: Nichtchemischer Beitrag zur Kritik der Lehre vom Calor animalis.
Arch. Anat. u. Physiol. 300-319 (1845).

BOHLMANN, A.: Klinische Funktionsprüfung des Herzens.
Schweiz. med. Wschr. 95, 1327 (1967).

BONNING, E.: Die physiologische Uhr, 3. Aufl.
Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1977.

BREBNER, D.F.; KERSLAKE, D. McK. and J.L. WADDELL: The diffusion of water vapour through human skin.
J. Physiol. (Lond.) 132, 225-231 (1956).

BURTON, A.C.; EDHOLM, O.G.: Man in a cold environment. London: Arnold 1955.

CENA, K.: Radiative heat loss from animal and man In: Heat Loss from Animals and Man, edited by J.L. Monteith and L.E. Mount, chapt. 3. London: Butterworths 1974.

CONROY, R.T.W.L. and J.N. MILLS: Human Circadian Rhythms. London: J.& A. Churchill 1970

CONVERTINO, V.A.; GREENLEAF, J.E. and E.M. BERNAUER: Role of thermal and exercise factors in the mechanism of hypervolemia. J. Appl. Physiol. 48, 657-664 (198o).

COWLES, R.B.: Possible origin of dermal temperature regulation. Evolution 12, 347-357 (1958).

CROCKFORD, G.W.; DAVIS, C.T.M. and J.S. WEINER: Circadian changes in sweating threshold. J. Physiol. (Lond.) 2o7, 26-27 p (197o).

DAVIS, C.T.M.; BROTHERHOOD, J.R. and E. ZEIDIFARD: Temperature regulation during severe exercise with some observations on effects of skin wetting. J. Appl. Physiol. 41, 772-776 (1976).

DAY, R.: Regulation of body temperature during sleep. Amer.J. Diseases Children, 61, 743-746 (1941).

DU BOIS, D.; DU BOIS, E.F.: A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known.
Arch.intern. Med. 17, 863-871 (1916).

FANGER, P.O.: Thermal Comfort, Copenhagen: Danish Technical Press 197o.

FOLK, G.E.Jr.: Introduction to Environmental Physiology, Philadelphia: Lea & Febiger 1966.

FOX, R.H.; CROCKFORD, G.W.; HAMPTON, I.F.G. and R. MACGIBBON: A thermoregulatory function test using controlled hyperthermia.
J. Appl. Physiol. 23, 267-275 (1967).

GAGGE, A.P.; HARDY, J.D. and G.M. RAPP: Proposed standard system of symbols for thermal physiology.
J. Appl. Physiol. 27, 439-446 (1969).

GÄRTNER, W.; GÜPPERT, H.: Topographische Untersuchungen über die Strahlungseigenschaften der lebenden menschlichen Haut.
Pflügers Arch. 28o, 224-235 (1964 a).

GÄRTNER, W.; LING, K. und H. GÜPPERT: Ober die Abhängigkeit der Temperaturstrahlung der lebenden menschlichen Haut von der Durchblutung.
Pflügers Arch. 28o, 236-242 (1964 b).

GEIGY: Wissenschaftliche Tabellen, 8. Aufl. 1977.

GESCHICKTER, E.H.; ANDREWS, P.A. and R.W. BULLARD: Nocturnal body temperature regulation in man: a rationale for sweating in sleep.
J. Appl. Physiol. 21, 623-63o (1966).

GESSLER, H.: Untersuchungen über die Wärmeregulation, I., II. und III. Mitteilung. Pflügers Arch. 207, 370-395 (1925).

GIERSE, A.: Quaenam sit ratio caloris organici. Dissertation, Halle 1842.

HARDY, J.D. and E.F. DU BOIS: Basal metabolism, radiation, convection and vaporisation at temperatures of 22 to 35 °C. J. Nutrition 15, 477 (1938)

HARDY, J.D.; GAGGE, A.P. and J.A.J. STOLWIJK (Editors): Physiological and behavioral temperature regulation. Springfield: C.C. Thomas 1970

HARDY, J.D.; J.A.J. STOLWIJK and A.P. GAGGE: Man. In: Comparative Physiology of Thermoregulation, edited by G.C.Whittow, chapt. 5. New York-London: Academic Press 1971.

HARRIS, S.; BENEDICT, F.G.: A biometric study of basal metabolism in man. Carnegie Inst. Wash. Publ. Nr. 279 (1919).

HARRISON, M.H.; EDWARDS, R.J.; GRAVENAY, M.J.; COCHRANE, L.A. and J.A. DAVIS: Blood volume and plasma proteins responses to heat acclimatisation in humans. J. Appl. Physiol. 50, 597-604 (1981).

HEATH, J.D.: The origins of thermoregulation. In: Evolution and Environment, edited by E.T. Drake, chapt. 8. New Haven-London: Yale Univ.Press 1968.

HEERD, E.; OHARA, K.: Untersuchungen über die Wasserdampfabgabe kleiner Hautflächen beim Menschen. Pflügers Arch. 276, 32-41 (1962).

HEISE, A.: Der Einfluß der Umgebungstemperatur auf verschiedene temperaturregulatorische Größen beim Menschen mit besonderer Berücksichtigung der Tagesperiodik.
Dissertation, München 1969.

HENANE, R.; BUGUET, A.; ROUSSEL, B. and J. BITTEL: Variations in evaporation and body temperature during sleep in man.
J. Appl. Physiol. 42, 5o-55 (1977).

HENSEL, H.; BROCK, K. and P. RATHS: Homeothermic Organisms.
In: Temperature and Life, edited by Precht, H.; Christophersen; Hensel, H. and W. Lacher. Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1973.

HILDEBRANDT, G.: Biologische Rhythmen und Arbeit.
Wien-New York: Springer 1976.

HODGMAN, C.D.; WEAST, R.C. and S.M. SELBY: Handbook of Chemistry and Physics.
Cleveland: Chem. Rubber Publ. 196o.

HÜFLER, W.: Changes in regional distribution of sweating during acclimatisation to heat.
J. Appl. Physiol. 25, 5o3-5o6 (1968 a).

HÜFLER, W.: Hitzeakklimatisation.
Hippokrates, 39, 517-524 (1968 b).

HÖFLER, W.; J. LADIPOH und U. LAASER:
Beziehungen zwischen Schweißmenge, Verdunstung und Körpertemteratur bei der Akklimatisation in künstlich feuchtheißem Klima.
Int. Z. angew. Physiol 27, 34 - 42 (1969)

HOFFMANN, K.: Circadiane Periodik bei Tupajas (Tupaia glis) in konstanten Bedingungen.
Zool. Anz. Suppl. 33, 171-177 (197o).

ITOH, S.; OGATA, K. and H. YOSHIMURA: Advances in Climatic Physiology.
Berlin-Heidelberg-New York: Springer; Tokyo: Igaku Shoin 1972.

JOHANSSON, J.E.: Ober die Tagesschwankungen des Stoffwechsels und der Körpertemperatur in nüchternem Zustande und vollständiger Muskelruhe.
Skand. Arch. Physiol. 8, 85-142 (1898).

JORGENSEN, T.: Die Körperwärme des gesunden Menschen.
Leipzig: Vogel 1873.

KERSLAKE, D. McK.: The Stress of hot Environments.
Cambridge: University Press 1972.

KLEITMAN, N.: Studies of the physiology of sleep.
I. The effects of prolonged sleeplessness on man.
Amer. J. Physiol. 66, 67-92 (1923).

KNAUTH, P.; RUTHENFRANZ, J.: Untersuchungen zur Circadianrhythmik der Körpertemperatur bei langsam und schnell rotierenden Schichtplänen.
In: Hildebrandt, G. (Hrsg.), Biologische Rhythmen und Arbeit, pp 91-96. Wien-New York: Springer (1976).

KOE, K.F.: Untersuchungen zur Tagesperiodik der menschlichen Körpertemperaturen.
Dissertation, Tübingen 1963.

KUNO, Y.: Human Perspiration.
Springfield, Ill.: Thomas 1956.

LAASER, U.: Physiologische Reaktionen während eines fünfwöchigen Daueraufenthaltes in einem künstlichen feuchtheißen Klima.
Int. Z. angew. Physiol. 25, 279-3o2 (1968).

LIEBERMEISTER, C.: Handbuch der Pathologie und Therapie des Fiebers.
Leipzig: Vogel 1875.

McARDLE, B.; DUNHAM, W.; HOLLING, H.E.; LADELL, W.S.S.; SCOTT, J.W.; THOMSON, M.L.; WEINER, J.S.: The prediction of the physiological effects of warm and hot environments.
Med. Res. Counc. London R.N.P. Rep. No. 47/391 (1947).

MENZEL, W.: Menschliche Tag-Nacht-Rhythmik und Schichtarbeit.
Basel-Stuttgart: Schwabe 1962.

MITCHELL, J.W.; NADEL, E.R. and STOLWIJK, J.A.J.: Respiratory weight losses during exercise.
J. Appl. Physiol. 32, 474-476 (1972).

MITCHELL, J.W.: Energy exchanges during exercise.
In: Problems with Temperature Regulation during Exercise, edited by E.R. Nadel, pp 11-26,
New York: Academic Press (1977).

NADEL, E.R.; R.W. BULLARD and STOLWIJK, J.A.J.:
Importance of skin temperature in the regulation of sweating.
J. Appl. Physiol. 31, 80-87 (1971)

NADEL, E.R.: Problems with Temperature Regulation during Exercise.
New York: Academic Press 1977

NEWMAN, R.W. Why man is such s sweaty and thirsty naked animal: A speculative review.
Human Biol. 42, 12-27 (1970)

NISHI, Y.; GAGGE, A.P.: Direkt evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation.
J. Appl. Physiol. 29, 83o-838 (197o).

PEMBREY, M.S.: Animal heat.
In: Textbook of Physiology, edited by E.A.Schäfer, Vol. I, 785-867, Edinburgh-London, 1898.

PFLEIDERER, H.; BOTTNER, K.: Die physiologischen und physikalischen Grundlagen der Hautthermometrie.
Leipzig: Barth 1935.

ROBERTS, M.F.; WENGER, C.B.; STOLWIJK, J.A.J. and E.R. NADEL: Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation.
J. Appl. Physiol. 43, 133-137 (1977).

RAMANATHAN, N.L.: A new weighting system for mean surface temperature of human body.
J. Appl. Physiol. 19, 531-533

ROBERTS, M.F.; WENGER, C.B.; STOLWIJK, J.A.J. and E.R. NADEL: Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. J. Appl. Physiol. 43, 133-137 (1977).

RUTENFRANZ, J.: Schichtarbeit und biologische Rhythmik. In: Biologische Rhythmen, 12. Deidesheimer Gespräch: Drug Res. 28 (II), 1809-1872 (1978).

SACHS, L.: Angewandte Statistik. Berlin-Heidelberg-New-York: Springer 1974.

SCHMIDT, T.H.: Thermoregulatorische Größen in Abhängigkeit von Tageszeit und Menstruationszyklus. Dissertation, München 1972.

SENAY, L.C.; MITCHELL, D. and C.H. WYNDHAM: Acclimatisation in a hot, humid environment: body fluid adjustments. J. Appl. Physiol. 40, 786-796 (1976).

SNELLEN, J.W.; MITCHELL, D. and C.H. WYNDHAM: Heat of evaporation of sweat. J. Appl. Physiol. 29, 40-44 (1970).

SONDEN, K.; TIGERSTEDT, R.: Untersuchungen über die Respiration und den Gesamtstoffwechsel des Menschen. Skand. Arch. Physiol. 6, 1-165 (1895).

TEICHNER, W.H.: Assessment of mean body surface temperature. J. Appl. Physiol. 12, 169-176 (1958)

THAUER, R.; ZÖLLNER, G.: Der insensible Gewichtsverlust als Funktion der Umweltbedingungen. Seine Abhängigkeit von dem Wasserdampfdruck der Luft im indifferenten Temperaturbereich.
Pflügers Arch. 258, 58-71 (1953).

THAUER, R.; ZÖLLNER, G. und W. KAUFMANN: Der insensible Gewichtsverlust als Funktion der Umweltbedingungen. Der Anteil von Atmung und Haut an der Gesamtperspiratio.
Pflügers Arch. 260, 1-23 (1954).

TIMBAL, J.; COLIN, J. and C. BOUTELIER: Circadian variations in the sweating mechanism.
J. Appl. Physiol. 39, 226-230 (1975).

TODT, D.: Untersuchungen über Öffnung und Anthocyangehaltsveränderungen der Blüten von Cichorium intybus im Licht-Dunkel-Wechsel und unter konstanten Bedingungen.
Z. Bot. 50, 1-21 (1962)

VAN ACKEREN, G.: Beziehungen zwischen regionaler Verteilung der Schweißproduktion und Abweichung von der "Predicted 4-Hrs Sweat Rate" P4SR.
Int. Z. angew. Physiol. 31, 11-40 (1972)

VAN DER WAERDEN, B.L. und E. NIEVERGELT:
Tafeln zum Vergleich zweier Stichproben mittels X-Test und Zeichentest.
Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1956

VÖLKER, H.: Über die tagesperiodischen Schwankungen einiger Lebensvorgänge des Menschen.
Pflügers Arch. 215, 43-77 (1927)

WESTIN,J.B.: Circadian variations in human sweat rate during work in heat.
Israel J. Med. Sci. 12, 832-835 (1976).

WENGER, C.B.; ROBERTS, M.F.; STOLWIJK, J.A.J. and E.R. NADEL: Nocturnal lowering of thresholds for sweating and vasodilation.
J. Appl. Physiol. 41, 15-19 (1976).

WENZEL, H.G.; PIEKARSKI, C.: Klima und Arbeit.
Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Sozialordnung, 2. Auflage, München 1982.

WEVER, R.: The circadian multi-oszillator system of man.
Int. J. Chronobiol 3, 19-55 (1975).

WEVER, R.: The Circadian System of Man.
New York-Heidelberg-Berlin: Springer 1979.

WHITTOW, G.C.: Evolution of thermoregulation.
In: Comparative Physiology of Thermoregulation.
edited by G.C. Whittow, Vol. III, chapt. 5.
New York-London: Academic Press 1973.

WYNDHAM, C.H.; WILLIAMS, C.G.; MORRISON, J.F.; HEYNS, A.J.A. and J. SIEBERT: Tolerance of very hot humid environments by highly acclimatized Bantu at rest.
Brit. J. industr. Med. 25, 22-29 (1968).

WYNDHAM, C.H.; ROGERS, G.G.; SENAY, L.C. and D. MITCHELL: Acclimatization in a hot, humid environment: cardiovaskular adjustments.
J. Appl. Physiol. 40, 779-785 (1976).

ZOGHAIBI, M.: Tagesperiodik der menschlichen Körpertemperaturen in warmer Umgebung.
Dissertation, Tübingen 1967.

Liste der verwendeten Abkürzungen

Symbole:

A	= Fläche (m^2)
B	= Luftdruck (mm Hg)
C	= Konvektion (W/m^2)
c	= spez. Wärme ($W \cdot h/(kg \cdot {}^oC)$
E	= Evaporation (W/m^2)
h	= Wärmestromkoeff. ($W/(m^2 \cdot {}^oC)$)
l	= Länge (cm)
M	= Metabolismus (W/m^2)
	= Mensor
m	= Gewicht (kg)
$\dot{m}$	= Gewichtsverlust (kg/h)
N	= Nulldurchgang, Nacht
P	= Wasserdampfdruck (mm Hg)
R	= Strahlung (W/m^2)
RF	= relative Feuchtigkeit
RQ	= respirator. Quotient
S	= Speicherung (W/m^2)
SD	= Standardabweichung
STPD	= Standard Pressure Dry
$S_{\bar{x}}$	= Standardfehler
T	= Tag, Temperatur (^oK)
t	= Temperatur (^oC)
$\dot{V}$	= Ventilation (l/min)
v	= Geschwindigkeit (m/s)
VP	= Versuchsperson(en)
$\bar{x}$	= Mittelwert
Ø	= Phasendauer
	= Durchschnitt

Indizes:

a	= Umgebung
b	= Körper
br	= Brust
c	= Konvektion
D	= Du Bois
d	= trocken
	= Differenz
da	= Daumen
diff	= Diffusion
e	= Evaporation
ep	= Epigastrium
ex	= Exspiration
fu	= Fuß
ha	= Hand
max	= Maximum
oa	= Oberarm
os	= Oberschenkel
r	= Strahlung
rc	= Strahlung + Konvektion
re	= Rektal
rs	= reguliertes Schwitzen
s	= Haut
st	= Stirn
ua	= Unterarm
us	= Unterschenkel
w	= feucht
wb	= Feuchtthermometer
ze	= Zehe

Faktoren und Konstanten

α, β	= Faktoren zur Berechnung des Konvektionswärmestroms
ε	= Emissionszahl der menschlichen Haut
λ	= Verdunstungsenthalpie des Wassers (2416 kWs/kg)
η	= Wirkungsgrad
σ	= Stefan-Boltzmann-Konstante ($5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $W/(m^2 \cdot {}^oK^4)$)
ψ	= spezifische Dichte in g/l, STPD

Lebenslauf

25.7.1942	in Detmold geboren
1949 – 53	Besuch der Volksschulen in Detmold und Ennigloh
1953 – 59	Besuch der Realschulen in Bünde und Detmold, Abschluß: mittlere Reife
1960 – 64	Soldat auf Zeit bei der Bundeswehr, letzter Dienstgrad: Stabsunteroffizier
1962 – 64	Lehre als Rundfunk- und Fernsehtechniker in Oldenburg, Abschluß: Rundfunk- und Fernsehtechniker
1964 – 65	Besuch der Technikerschule für Elektronik in Sindelfingen, Abschluß: Staatl. gepr. Techniker
1965 – 68	Besuch des Westfalen-Kollegs in Bielefeld, Abschluß: Abitur
1968 – 77	Studium der Biologie an der Universität Tübingen, Abschluß: Diplom
1972 – 81	Studium der Medizin an der Universität Tübingen, Staatsexamen (3. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung) 9.4.1981 21.4.1981: Approbation als Arzt
1981 –	Assistenzarzt am Medizinischen Strahleninstitut Tübingen (Direktor: Prof. Dr. W. Frommhold)